

# 基于区域划分的地铁网络脆弱性评价方法

沈吟东, 宫 剑

(华中科技大学自动化学院, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 结合地铁网络的拓扑结构和运营客流分布的特点, 提出了基于区域划分的地铁网络脆弱性评价方法, 其中分别定义了站点、路段和区域的脆弱值计算公式. 由于区域脆弱值与区域划分密切相关, 因此进一步设计了两种区域划分方法. 一种是站点聚合法, 侧重于反映地铁网络区域的结构脆弱性, 其基本思路是以脆弱值高的站点为中心, 迭代聚合与之耦合度高的站点进而形成脆弱区域; 另一种是路段剔除法, 侧重于反映客流分布对地铁网络脆弱性的影响, 其基本思路是对给定的一个区域逐步从中剔除脆弱值低的线路实现区域划分. 最后, 利用一个现实的城市地铁系统验证评价方法的有效性.

**关键词:** 地铁网络; 脆弱性评价; 区域划分; 拓扑结构; 运营客流分布

中图分类号: X913.4; U491.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2018)03-0289-09

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2018.03.001

## Vulnerability assessment of urban metro network based on region partitioning

Shen Yindong, Gong Jian

(Image Processing and Intelligent Control Key Laboratory of Education Ministry, School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A vulnerability assessment approach, based on metro network topology and the distribution of passenger flows, for metro networks based on region partitioning is proposed. The vulnerabilities of sites, lines and regions are defined separately. Moreover, since the vulnerability assessment value of a region is greatly affected by the partition of the metro network, two region partitioning methods are elaborately devised. One is site-polymerization method, which primarily reflects the structural vulnerability of a metro network in view of vulnerable regions formed. The other is segment-elimination method, which primarily reflects the influence of passenger flow distribution on the vulnerability of a metro network. Finally, the proposed vulnerability assessment approach is verified by a real city metro system.

**Key words:** metro network; vulnerability evaluation; region partitioning; topological structure; passenger flow distribution

## 1 引 言

城市地铁网络系统(本文简称地铁网络)在缓解城市交通压力、拓展城市空间等方面具有突出作用, 日益成为城市交通系统的关键环节. 但是由于存在许多潜在的危险因素, 可能引发各种突发事件, 致使运营中断

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2017-06-05.

基金项目: 国家社会科学基金重大资助项目(13&ZD175); 国家自然科学基金资助项目(71571076; 71171087).

或系统损毁难以完全避免,进而导致交通堵塞,运输效率降低甚至交通瘫痪等严重后果<sup>[1]</sup>.因此,如何全面有效评估地铁网络脆弱性,为预防、应急和救援提供依据,保障地铁网络在遭受重大打击之后还能恢复或者维持在一定的服务能力内,成为重要的研究课题<sup>[2,3]</sup>.

脆弱性的概念,是由 Timmermann 于 1981 年首先提出的,用来分析系统由于存在固有的缺陷弱点和薄弱环节,对灾害事件的承受能力并从中恢复的能力,是系统的一种隐性属性<sup>[4]</sup>.自本世纪起,特别是在日本阪神大地震和美国“9·11”恐怖袭击之后,交通系统脆弱性吸引了广泛研究兴趣<sup>[5-7]</sup>.Murray<sup>[8]</sup>把交通系统脆弱性的评价方法大致归纳为如下四类:情景分析法、假定攻击策略法、模拟仿真法和计算模型评估法.除此之外,地铁系统脆弱性研究还主要包括研究其脆弱性的内涵和外延<sup>[9]</sup>、网络脆弱性指标<sup>[10]</sup>、运营脆弱性分析<sup>[1]</sup>,以及网络拓扑脆弱性分析和评价<sup>[11,12]</sup>.由于对于地铁网络脆弱性指标研究许多是反映地铁拓扑结构的脆弱性,包括度、路径长度、网络效率和介数值等<sup>[11,12]</sup>.因此,地铁网络脆弱性研究也多集中于研究地铁网络中的关键站点和路段,称为 MVNP(最关键节点问题)和 MVEP(最关键边问题),其中的评估方法主要包括度、中心性和网络效率<sup>[11,12]</sup>.例如,Deng 等<sup>[11]</sup>通过对观测南京地铁网络拓扑结构与服务性能水平的关系,发现综合考虑全局效率和平均路径长度,可以定性计算节点的脆弱性,并提出了基于全局效率和平均路径长度的节点脆弱性的计算方法;白亚飞<sup>[13]</sup>和窦元辰<sup>[14]</sup>利用灰色关联分析方法和模糊综合评价方法分析了大客流对地铁站点脆弱性的影响.总之,目前研究主要集中对网络单一组件的脆弱性分析,而对于网络区域脆弱性的研究却很少提及.然而,与节点故障和边故障相比,区域故障往往危害更大.例如 2015-07-23 由于暴雨导致武汉地铁部分区段雨水涌入轨行区,导致地铁 4 号线临时改变运营区段.目前随着我国地铁网络规模的不断扩大,地铁网络的站点和路段间的关联性变得越来越强,故障可能会超出单一站点和路段的界限而在不同的站点和路段间进行传播.因此,考虑站点和路段间的关联性,以区域为单位研究评价地铁网络的脆弱性具有重要理论和现实意义.因此,本文拟在对地铁网络节点和路段脆弱性研究的基础上,研究设计地铁网络区域脆弱性评估方法.

由于地铁网络区域脆弱性评价与区域划分密不可分.不同的区域划分方式将可能导致不同的脆弱性评价结果.目前对于网络区域结构的定义或评价一直没有权威且一致的认可,较为常用的是利用模块度、相对连接度等指标对区域进行评价<sup>[15-17]</sup>.本文拟基于模块度指标,综合考虑地铁网络中节点和边的脆弱关联度,并且结合地铁网络的拓扑结构和运营客流分布的特点,提出区域脆弱值评价指标,并设计一个基于区域划分的地铁网络脆弱性评价方法.其中,包含两种区域划分方法:站点聚合法和路段剔除法.前者的基本思路是以脆弱值高的站点为中心,迭代聚合与之耦合度高的站点进而形成脆弱区域;后者的基本思路是对给定的一个区域逐步从中剔除脆弱值低的线路实现区域划分.最后,利用一个现实的城市地铁系统验证该评价方法.

## 2 地铁网络脆弱性评价方法

随着城市地铁路网规模的不断扩大,客流量持续增长,部分车站和区间的承载能力已达到饱和,路网运营风险增大,因此通过有效的方法对地铁网络区域进行辨识和检测,有利于预防突发事件和提供应急方案.基于网络理论和方法,以车站为站点,相邻车站的区间为路段,构造地铁路网模型.本文将地铁网络描述为一个无向图  $G = (V, E, A)$ ,其中站点集  $V = \{i | i = 1, 2, \dots, n\}$  表示地铁网络  $G$  中包含的全部  $n$  个车站(站点)的集合;路段集  $E = \{e_{ij} | i, j \in V, i \neq j\}$  表示相邻两个车站间路段的集合,  $e_{ij}$  是由相邻站点  $i$  和  $j$  构成的路段;区域集  $A = \{r = (V_r, E_r)\}$  表示网络中划分的区域的集合,任意区域  $r$  是由该区域内的站点集  $V_r$  和站点间的路段集  $E_r$  构成,并且满足  $\bigcap_{r \in A} V_r = \emptyset$  和  $\bigcup_{r \in A} V_r = V$ .

地铁网络拓扑结构不同,导致地铁网络的连通性不同,网络的脆弱性分布随之改变.客流分布则反映了地铁网络对交通需求的敏感程度,不同的客流分布导致网络中各站点、路段和区域的负载不同,脆弱性分布也随之改变.因此将地铁网络脆弱型指标分为结构脆弱型指标和状态脆弱型指标.结构脆弱型指标是指评价地铁网络在网络拓扑结构层面脆弱性的指标,例如度、介数等.状态脆弱型指标是指评价地铁网络在道路

交通网络的流量状态层面脆弱性的指标, 例如站点客流, 路段断面客流等. 本文将基于网络的拓扑结构和运营客流分布, 分别设计了站点、线路和区域脆弱性的评价方法.

## 2.1 站点的脆弱性评价

在地铁网络中, 站点是重要的因素. 从结构角度分析, 节点度和点介数反映了网络的连通性, 而站点客流量反映了站点的运输重要性. 对于任意站点  $i$ , 其节点度  $d_i$  和点介数值  $b_i$  分别为

$$d_i = \sum_{j \in V} e_{ij}, \quad (1)$$

$$b_i = \sum_{j, k \in V (j \neq k)} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}, \quad (2)$$

其中  $n_{jk}$  表示站点  $j$  到  $k$  最短路径的数量,  $n_{jk}(i)$  表示站点  $j$  到  $k$  经过站点  $i$  最短路径的数量.

因此, 对于地铁网络站点脆弱性分析, 可以选择利用结构型指标: 节点度  $d_i$  和点介数值  $b_i$ , 以及状态型指标: 站点客流量  $\theta_i(\Delta t)$  来进行综合衡量. 定义站点  $i$  的脆弱值

$$vv_i = \omega_1 d'_i + \omega_2 b'_i + \omega_3 \theta'_i(\Delta t), \quad (3)$$

其中偏好因子  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ , 可以由不同城市根据对节点度、节点介数和客流量的偏好程度自行设置,  $d'_i$ 、 $b'_i$  和  $\theta'_i(\Delta t)$  为其相应指标  $d_i$ 、 $b_i$  和  $\theta_i(\Delta t)$  按照 S-准则归一化处理后的数值.

值得说明, 不同的地铁网络指标量纲数值和单位不尽相同, 可能无法直接进行加权求和. 因此需要将各指标值进行归一化处理, 即将其转化为范围在  $[0, 1]$  之间的数值. 转化时, 首先要制定评价标准, 评价标准一般分为三种: L-准则(评价准则的值越大越好), S-准则(评价准则的值越小越好)和 D-准则(评价准则的值与期望值相差越小越好). 本文统一采用 S-准则, 即

$$d'_i = \frac{d_i - \min_{i \in V} d_i}{\max_{i \in V} d_i - \min_{i \in V} d_i}. \quad (4)$$

## 2.2 路段的脆弱性评价

在地铁网络中, 路段也是重要的因素, 从结构角度分析, 边介数反映了网络的连通性, 而路段断面客流量更能反映人们出行的真实意愿. 对于任意路段  $e_{ij}$ , 其边介数值

$$b_{ij} = \sum_{s, t \in V (ij \neq st)} \frac{n_{st}(e_{ij})}{n_{st}}, \quad (5)$$

其中  $n_{st}$  表示站点  $s$  到  $t$  最短路径的数量,  $n_{st}(e_{ij})$  表示站点  $s$  到  $t$  经过边  $e_{ij}$  最短路径的数量.

因此, 对于地铁网络路段脆弱性分析, 可以选择利用结构型指标: 边介数值  $b_{ij}$ , 以及状态型指标: 路段断面客流量  $\theta_{ij}(\Delta t)$  来进行综合衡量. 定义路段  $e_{ij}$  的脆弱值

$$ve_{ij} = \omega_1 b'_{ij} + \omega_2 \theta'_{ij}(\Delta t), \quad (6)$$

其中偏好因子  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , 可以由不同城市根据对边介数和路段客流量的偏好程度自行设置,  $b'_{ij}$  和  $\theta'_{ij}(\Delta t)$  为其相应指标  $b_{ij}$  和  $\theta_{ij}(\Delta t)$  按照 S-准则归一化处理后的数值.

## 2.3 区域的脆弱性评价

在地铁网络中, 区域是重要的因素, 仍然可以用结构型和状态型两类指标进行评价. 为此, 从结构角度分析, 本文定义区域度和区域介数两个概念用于反映网络的连通性; 从状态角度分析, 定义区域客流量用于反映区域运输客流的能力; 最后, 综合区域度、区域介数值和区域客流量三个指标来衡量地铁网络中区域的脆弱性.

1) 任意区域  $r$  的区域度  $\tilde{d}_r$  可以定义为区域  $r$  与区域外站点相关联的边的个数

$$\tilde{d}_r = \sum_{i \in V_r, j \notin V_r} e_{ij}. \quad (7)$$

2) 任意区域  $r$  的区域介数值  $\tilde{b}_r$  是指网络中所有最短路径中经过该区域  $r$  的数量比例. 计算时可以把区域  $r$  看作点  $r'$ , 与区域外的站点构造站点集  $V'$ , 计算区域介数值

$$\tilde{b}_r = \sum_{j,k \in V'(j \neq k)} \frac{n_{jk}(r')}{n_{jk}}, \quad (8)$$

其中  $n_{jk}$  表示区域  $r$  外点  $j$  到  $k$  的最短路径的数量,  $n_{jk}(r')$  表示区域  $r$  外站点  $j$  到  $k$  经过点  $r'$  最短路径的数量.

3) 任意区域  $r$  的区域客流量  $\tilde{\theta}_r(\Delta t)$  可以定义为单位时间区域  $r$  内站点客流量的总和

$$\tilde{\theta}_r(\Delta t) = \sum_{i \in r} \theta_i(\Delta t). \quad (9)$$

因此, 对于地铁网络区域脆弱性分析, 可以选择利用结构型指标: 区域度  $\tilde{d}_r$  和区域介数  $\tilde{b}_r$ , 以及状态型指标: 区域客流量  $\tilde{\theta}_r(\Delta t)$  来进行综合衡量. 定义区域  $r$  的脆弱值

$$va_r = \omega_1 \tilde{d}_r + \omega_2 \tilde{b}_r + \omega_3 \tilde{\theta}_r(\Delta t), \quad (10)$$

其中偏好因子  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ , 可以由不同城市根据对区域度、区域介数和区域客流量的偏好程度自行设置,  $\tilde{d}_r$ ,  $\tilde{b}_r$  和  $\tilde{\theta}_r(\Delta t)$  为其相应指标  $\tilde{d}_r$ ,  $\tilde{b}_r$  和  $\tilde{\theta}_r(\Delta t)$  按照 S-准则归一化处理后的数值.

### 3 地铁网络脆弱性区域划分方法

给定一个地铁网络, 其站点和路段都是确定的, 但是脆弱区域却是不确定的. 不同的区域划分, 将可能导致不同的区域脆弱性评价结果. 因此, 为了以区域为单位合理地评价地铁网络的脆弱性, 设计有效的脆弱区域划分方法是区域脆弱性评价的重要基础. 针对一般区域划分问题, Clauset<sup>[15]</sup>提出了局部模块度作为区域划分质量的标准. 本文将局部模块度指标应用于地铁网络的区域划分, 提出了两种基于局部模块度的区域划分方法: 站点聚合法和路段剔除法.

#### 3.1 局部模块度

Clauset 给出了局部模块度  $Q$  的定义为网络中区域内部站点间相连的路段数( $L_{in}$ ) 与其内站点与区域外站点连接的路段数( $L_{out}$ )的比例. 为了防止分母为零, Clauset 将该定义修正为

$$Q = \frac{L_{in}}{L_{in} + L_{out}}. \quad (11)$$

该局部模块度可以衡量一个区域的紧密程度,  $Q$  值越大表示网络中区域的结构越紧密. 因此, 本文将利用该局部模块度作为地铁网络区域划分的评价函数.

#### 3.2 基于站点聚合的区域划分方法

基于站点聚合的区域划分方法(简称站点聚合法)的基本思路是以脆弱值高的站点为中心, 迭代聚合与之耦合值( $Q$  值)最大的节点, 进而形成紧密程度高的区域. 图 1 给出该方法示意图.

假设地铁网络的站点集为  $V$ , 其中各站点依据其脆弱值由大到小的次序排列, 令初始的未选站点集  $M = V$ , 初始的区域集合  $A = \emptyset$ , 初始站点  $i = 0$ , 下面结合图 1 详细阐述站点聚合法的具体步骤.

**步骤 1** 构造初始区域  $r$ . 把站点  $i \in M$  以及与其直接相连的全部未选站点组成一个初始区域  $r$ , 并计算该区域的局部模块度  $Q_r$ ;

**步骤 2** 选择候选站点  $j$ . 逐个考虑与当前区域  $r$  中任意站点有直接相连关系的未选站点, 分别将其与  $r$  中包含的全部站点一起形成一组临时区域, 并计算各个区域的  $Q$  值. 将  $Q$  值最大的区域定义为候选区域  $c$ , 相应的未选站点  $j$  定义为候选站点. 如果候选站点  $j$  满足聚合条件(即  $Q_c \geq Q_r$ ), 则执行步骤 3, 否则执行步骤 4;

**步骤 3** 更新区域  $r$ . 把站点  $j$  加入到区域  $r$  中, 并返回步骤 2;

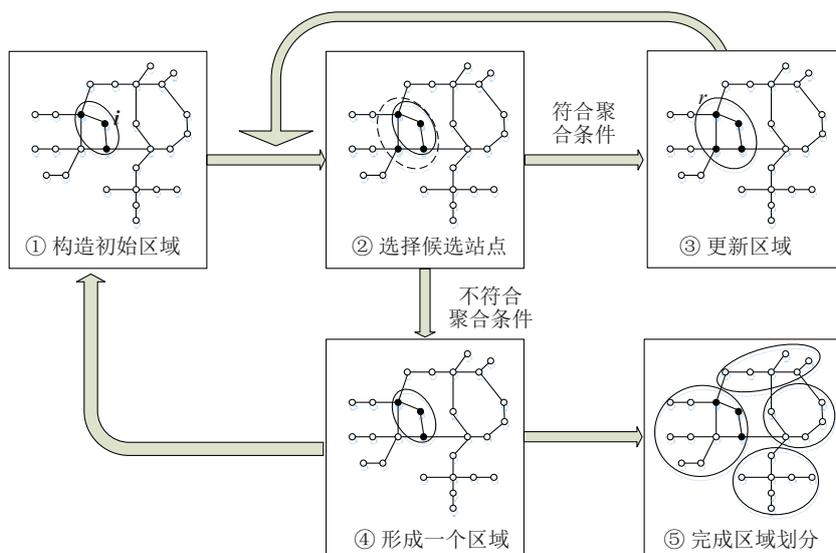


图 1 基于站点聚合的区域划分方法示意图

Fig. 1 Illustration of region partitioning based on the site polymerization method

步骤 4 形成区域  $r$ . 把  $r$  置入区域集合  $A$  中, 即  $A \leftarrow A \cup r$ , 并把  $r$  中的全部站点移出未选站点集  $M$ ;

步骤 5 判断是否存在脆弱值不小于预设阈值  $\mu$  的未选站点. 如果存在(即  $\max\{vv_i | i \in M\} \geq \mu$ ), 则把  $M$  中脆弱值最大的站点设为  $i$ , 返回步骤 1; 否则, 组合剩余的未选站点, 即把具有连接关系的所有站点自行组成一个区域, 形成完整的网络区域划分.

### 3.3 基于路段剔除的区域划分方法

基于路段剔除的区域划分方法(简称路段剔除法)的基本思路是将先未被划分的整个网络视为一个区域, 逐步从中剔除脆弱值低的路段, 形成由若干高脆弱值路段构成的高耦合( $Q$  值)的区域. 该方法示意图见图 2.

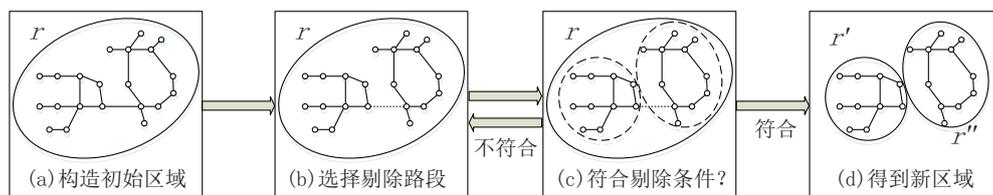


图 2 基于路段剔除的区域划分方法示意图

Fig. 2 Illustration of region partitioning based on the segment elimination method

假设地铁网络的路段集为  $E$ , 其中各路段依据其脆弱值由大到小的次序排列, 令初始的未选路段集  $K = E$ , 初始的区域集合  $A = \emptyset$ , 初始路段  $e_{ij}$ , 下面结合图 1 详细阐述站点聚合法的步骤.

步骤 1 构造初始区域  $r$ . 将整个网络构造成初始区域  $r$ , 计算该区域的局部模块度  $Q_r$ , 并将  $r$  加入到  $A$  中;

步骤 2 选择剔除路段  $e_{ij}$ . 判断  $K$  内存在脆弱值不大于预设阈值  $\mu$  的未选路段  $e_{ij}$ , 如果存在, 执行步骤 3, 否则输出完整的网络区域划分  $A$ ;

步骤 3 判断路段  $e_{ij}$  是否符合剔除条件.

1) 如果剔除路段  $e_{ij}$ , 该区域  $r$  内仍然存在其他节点与节点  $i$  和  $j$  相连, 则剔除该路段, 执行步骤 2;

2) 如果剔除路段生成新区域  $r'$  和  $r''$ , 如果满足  $Q_{r'} \geq Q_r$  或者  $Q_{r''} \geq Q_r$ , 且  $Q_{r'} \neq 0, Q_{r''} \neq 0$ , 则剔除路段  $e_{ij}$ , 如图 2(d)所示, 执行步骤 4;

3) 否则保留路段  $e_{ij}$ , 更新  $K$ , 执行步骤 2.

步骤 4 得到新区域. 将区域  $r'$  和  $r''$  加入到  $A$  中, 并从  $A$  中移除区域  $r$ , 执行步骤 2.

## 4 仿真分析

本文算法已经采用 C++ 语言进行实现, 并利用 2015 年某市的地铁网络和元月份的日均客流数据对网络站点、路段和区域评价方法进行了实验验证. 得到的站点、路段和区域的脆弱值均是其相应脆弱性指标在归一化之后加权求和的结果, 其中, 站点偏好因子取值为  $\omega_1 = 0.25, \omega_2 = 0.25, \omega_3 = 0.50$ ; 路段偏好因子取值为  $\omega_1 = 0.50, \omega_2 = 0.50$ ; 区域偏好因子取值为  $\omega_1 = 0.25, \omega_2 = 0.25, \omega_3 = 0.50$ .

### 4.1 站点和路段脆弱性分析

地铁网络的脆弱性依据脆弱值被分为 5 个等级, 其取值范围分别定义为严重级  $G1 \in (0.8, 1.0)$ , 危险级  $G2 \in (0.6, 0.8]$ , 较安全级  $G3 \in (0.4, 0.6]$ , 安全级  $G4 \in (0.2, 0.4]$  和很安全级  $G5 \in (0, 0.2]$ . 表 1 给出了基于站点脆弱值和路段脆弱值分别计算出的不同脆弱级别的站点和路段的比例.

表 1 不同脆弱级别的站点和路段的比例  
Table 1 Ratios of sites and segments with different vulnerability grades

	严重级	危险级	较安全级	安全级	很安全级
基于站点脆弱级(站点数: 124)	5%	8%	35%	42%	10%
基于路段脆弱级(路段数: 135)	5%	10%	40%	35%	10%

从表 1 可见, 该地铁网络处于严重级  $G1$ 、危险级  $G2$  和很安全级  $G5$  的站点相对较少, 分别只占 5%、8% 和 10%; 大部分站点是处于较安全级  $G3$  和安全级  $G4$ , 分别占 35% 和 42%. 类似地, 该地铁网络处于严重级  $G1$ 、危险级  $G2$  和很安全级  $G5$  的路段也相对较少, 分别只占 5%、10% 和 10%; 大部分路段是处于较安全级  $G3$  和安全级  $G4$ , 分别占 40% 和 35%. 总的来说, 该地铁网络中 85% 以上的站点和路段都处于较为安全的状态. 图 3 给出了更为直观的地铁网络脆弱图.

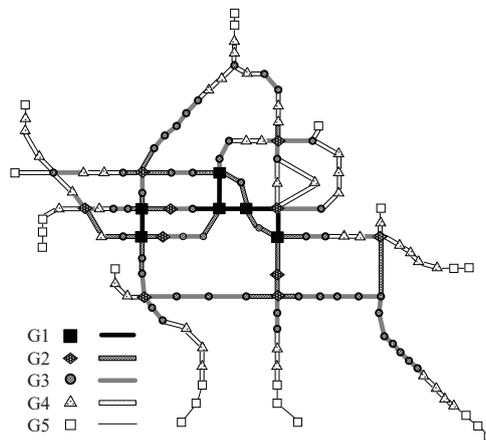


图 3 地铁网络站点和路段脆弱地图

Fig. 3 Vulnerability of sites and segments on a metro map

从表 3 中很容易看出, 地铁网络脆弱站点和路段大体呈现由内到外递减的趋势, 网络中心区域的站点和路段脆弱值高, 网络边缘的站点和路段脆弱值相对较低; 换乘站点由于客流汇集, 因此也是脆弱站点, 网络中心的换乘站点脆弱值最高, 而线路首末站的脆弱值是相对较低; 站点和路段的脆弱性是相关联的, 高脆弱值的站点相连的路段也是脆弱性高的.

另外, 因为站点和路段的综合脆弱值是受到结构脆弱值和状态脆弱值的影响, 因此有必要分析两者对综合脆弱值的影响. 根据式(3)和式(6), 可以定义站点  $i$  的结构脆弱值为  $\omega_1 d'_i + \omega_2 b'_i$ , 状态脆弱值为  $\omega_3 \theta'_i(\Delta t)$ ; 路段  $e_{ij}$  的结构脆弱值为  $\omega_1 b'_{ij}$ , 状态脆弱值为  $\omega_2 \theta'_{ij}(\Delta t)$ . 选取 1 月早高峰(8:00~9:00)、平

峰(11:00~12:00)和晚高峰(18:00~19:00)三个时段的日均客流数据进行实验, 得到站点和路段的结构脆弱值与状态脆弱值的差, 分别见图 4 和图 5.

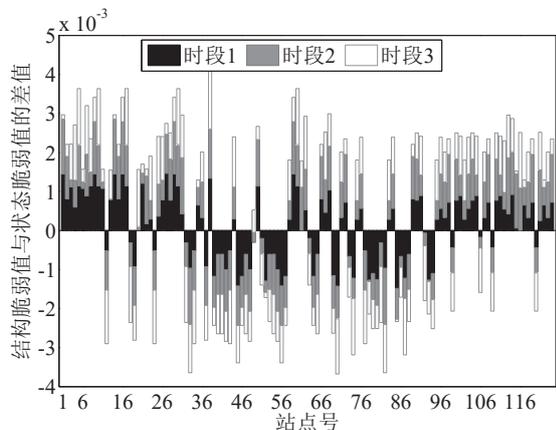


图 4 不同时段站点结构脆弱值与状态脆弱值差值

Fig. 4 Difference of the structure and state vulnerability values by time periods at each site

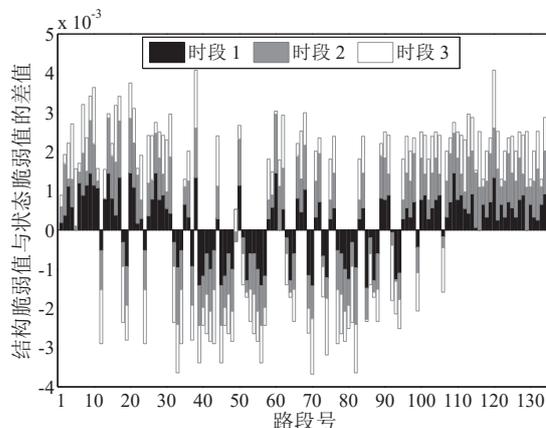


图 5 不同时段路段结构脆弱值与状态脆弱值差值

Fig. 5 Difference of the structure and state vulnerability values by time periods at each segment

从图 4 和图 5 中可以发现, 不同时段站点或路段的脆弱值存在变化, 不同指标对其影响不同. 根据图 4 可以把站点分为两类: 一类的结构脆弱值与状态脆弱值的差值始终为正数(即柱形在横坐标之上), 说明该站点的脆弱值受客流量变化的影响小, 而受地铁拓扑结构影响大, 可以称这些站点为结构脆弱型站点; 而另一类的结构脆弱值与状态脆弱值的差值始终为负数(即柱形在横坐标之下), 说明该站点的脆弱值受客流量变化的影响大, 而受地铁拓扑结构影响小, 可以称这些站点为状态脆弱型站点. 类似地, 从图 5 可见存在两类路段: 结构脆弱型路段和状态脆弱型路段. 确定了站点或路段的不同属性, 有助于提供相应的应急方法.

### 4.2 区域脆弱性分析

分别利用站点聚合算法和路段剔除算法对某市地铁路网进行区域划分, 划分结果见图 6 和图 7. 从图可见, 不同算法划分区域后, 区域的数量、分布以及区域内部结构均存在差异.

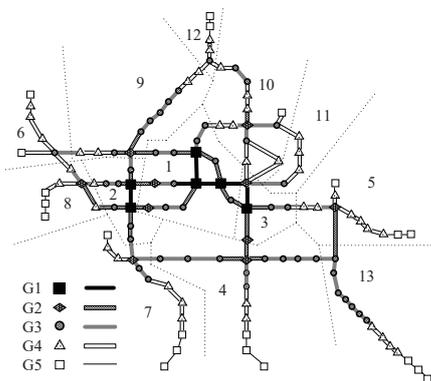


图 6 站点聚合算法划分的区域分布图

Fig. 6 Region partitioning result based on the site polymerization method

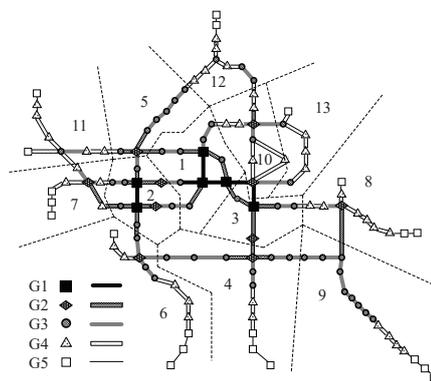


图 7 路段剔除算法划分的区域分布图

Fig. 7 Region partitioning result based on the segment elimination method

从图 6 可以发现, 站点聚合算法将网络中心划分成三个区域, 区域 1、区域 2 和区域 3, 其中区域 1 中拥有的 G1 的站点和路段最多, 区域面积最大. 从图 7 可以发现, 路段剔除算法也将网络中心划分成三个区域, 区域 1、区域 2 和区域 3, 三个区域范围大致相同.

利用公式(10)和公式(11),可以计算得到各区域的脆弱值以及区域 $Q$ 值,图8和图9分别给出了两种算法划分区域的脆弱值和区域 $Q$ 值对比情况.

由图8可见,不同算法划分的区域脆弱值分布趋势相同,大部分区域是处于较危险级G3和较安全级G4.但是划分的区域脆弱值差异很大,可见划分方法对区域的评价有显著影响.

图9表明,不同划分算法划分的区域 $Q$ 值较高,大部分高于0.6,说明划分的区域的内部结构较为稳定,区域划分结构较好.

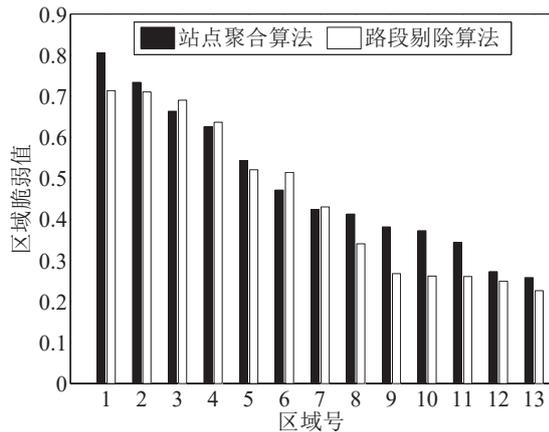


图8 两种算法划分区域的区域脆弱值对比

Fig. 8 Partitioning results comparison by regional vulnerability values

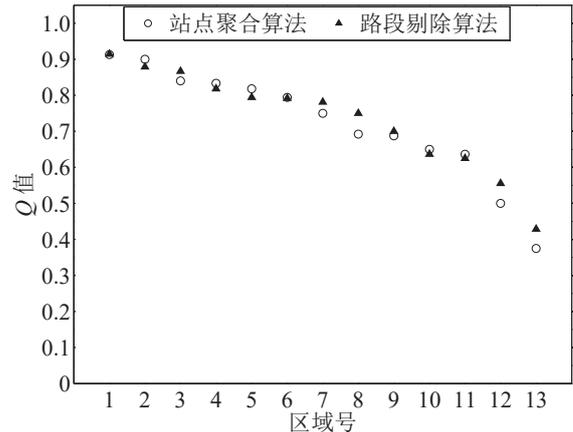


图9 两种算法划分区域的Q值对比

Fig. 9 Partitioning results comparison by Q value

为了更直观分析不同划分算法对区域的脆弱性评价的影响,选用1月早高峰(8:00~9:00)、平峰(11:00~12:00)和晚高峰(18:00~19:00)三个时段的日均客流数据进行实验,使用站点聚合划分方法和路段剔除划分方法划分并计算不同时段区域结构脆弱值和状态脆弱值的差值,见图10和图11.其中,根据式(10),区域 $r$ 的结构脆弱值为 $\omega_1 \tilde{d}_r + \omega_2 \tilde{b}_r$ ,状态脆弱值为 $\omega_3 \tilde{\theta}_r(\Delta t)$ .

从图10可见,基于站点聚合算法划分出的区域,在不同时段其结构脆弱值与状态脆弱值的差多为正数,说明采用站点聚合算法划分出的区域更易受到结构脆弱性指标影响.然而,从图11可见,基于路段剔除算法划分出的区域,在不同时段其结构脆弱值与状态脆弱值的差多为负数,说明采用路段剔除算法划分出的区域更易受到状态脆弱性指标影响.

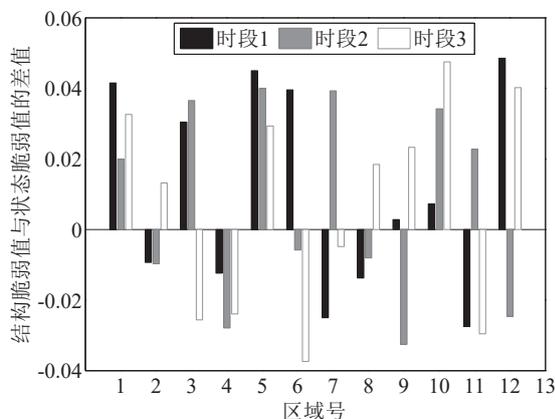


图10 站点聚合算法划分区域结构脆弱值与状态脆弱值差值

Fig. 10 Difference of the structure and state vulnerability values produced by the site polymerization method

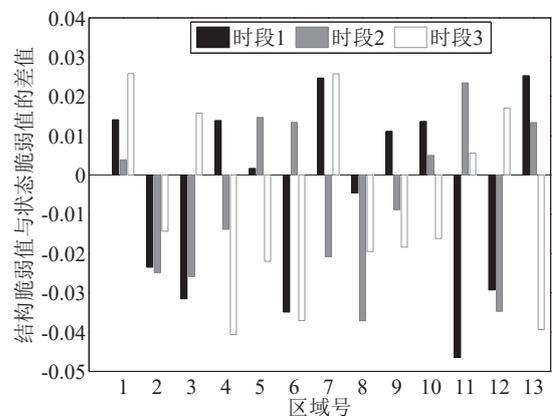


图11 路段剔除算法划分区域结构脆弱值与状态脆弱值差值

Fig. 11 Difference of the structure and state vulnerability values produced by the segment elimination method

## 5 结束语

本文结合地铁网络的拓扑结构和客流分布特点,提出了基于区域划分的地铁网络脆弱性评价方法,其中分别定义了站点、路段和区域的脆弱值计算方法,并且进一步从地铁网络的结构脆弱性和客流分布对网络脆弱性的影响两个不同的角度,分别设计了站点聚合法和路段剔除法两种区域划分方法,从而实现对地铁网络多角度、分区域的脆弱性评价,这对于保障地铁路网安全可靠的运营和整体性能的有效发挥具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 陈菁菁. 城市轨道交通重大运营事故和灾害分析. 城市轨道交通研究, 2010, 13(5): 41–45.  
Chen J J. Analysis on grave accidents and disasters in urban rail transit operation. Urban Mass Transit, 2010, 13(5): 41–45. (in Chinese)
- [2] Hong L, Ouyang M, Peeta S, et al. Vulnerability assessment and mitigation for the Chinese railway system under floods. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 137: 58–68.
- [3] 李英, 周伟, 郭世进. 上海公共交通网络复杂性分析. 系统工程, 2007, 25(1): 38–41.  
Li Y, Zhou W, Guo S J. An analysis of complexity of public transportation network in Shanghai. Systems Engineering, 2007, 25(1): 38–41. (in Chinese)
- [4] Bankoff G, Frek G, Hilhorst D. Mapping Vulnerability, Disasters, Development and People. London: Earth Scan Publishers, 2004: 23–24.
- [5] 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. Journal of the Royal Society Interface, 2016, 13(118): 1–11.
- [6] 李大愚, 高光锐. 城市地铁网脆弱性分析. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 157–161.  
Li D Y, Gao G R. Analysis of vulnerability of urban metro network. China Safety Science Journal, 2016, 26(3): 157–161. (in Chinese)
- [7] 李勇建, 乔晓娇, 孙晓晨, 等. 基于系统动力学的突发事件演化模型. 系统工程学报, 2015, 30(3): 306–318.  
Li Y J, Qiao X J, Sun X C, et al. Modeling the evolution of emergency based on system dynamics. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(3): 306–318. (in Chinese)
- [8] Murray A T, Matisziw T C, Grubestic T H. A methodological overview of network vulnerability analysis. Growth and Change, 2008, 39(4): 573–592.
- [9] 韩豫, 成虎. 地铁系统脆弱性的建模与分析. 工业安全与环保, 2016, 42(7): 11–14.  
Han Y, Cheng H. Modeling and analysis of subway system vulnerability. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(7): 11–14. (in Chinese)
- [10] 袁朋伟, 宋守信, 董晓庆, 等. 城市轨道交通系统脆弱性因素辨识模型研究. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 110–118.  
Yuan P W, Song S X, Dong X Q, et al. Vulnerability identification model of urban rail transit system. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(5): 110–118. (in Chinese)
- [11] Deng Y L, Li Q M, Lu Y, et al. Topology vulnerability analysis and measure of urban metro network: The case of Nanjing. Journal of Networks, 2013, 8(6): 1350–1356.
- [12] Zou Z Y, Lai J Y, Gao J Z. Reducing the vulnerability of network by inserting modular topologies. Chaos, 2013, 23(1): 251–260.
- [13] 白亚飞. 大客流条件下地铁车站的脆弱性研究. 北京: 北京交通大学, 2013: 22–34.  
Bai Y F. Research on Subway Station Vulnerability under Mass Passenger Flow Conditions. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013: 22–34. (in Chinese)
- [14] 窦元辰. 大客流状态下地铁脆弱性中暴露度研究. 北京: 北京交通大学, 2015: 15–31.  
Dou Y C. Research on the Subway Station of the Exposure Degree of Vulnerability under High Passenger Flow Conditions. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 15–31. (in Chinese)
- [15] Clauset A. Finding local community structure in networks. Physical Review E, 2005, 72(2): 254–271.