

基于复杂网络模型的地铁系统脆弱性分析

王希良 李季瑶 廉梦珂 孙志静

(石家庄铁道大学交通运输学院, 050043, 石家庄//第一作者, 教授)

摘要 基于影响地铁系统脆弱性的干扰事件, 构建了干扰事件的有向复杂网络。采用网络密度、平均路径长度、度和度分布, 以及聚类系数等分析指标, 进行复杂网络的拓扑特征分析。分析结果显示, 只有少数关键节点能直接影响地铁脆弱性。采用复杂网络的互信息理论, 对干扰事件有向复杂网络节点进行信息量计算和重要性评价, 进而找到重要节点。评价结果表明, 影响地铁系统脆弱性的关键因素是车站客流量、车辆系统和设备系统, 可采取相应的针对性措施来提高地铁运营的安全性。

关键词 地铁; 运行安全; 脆弱性分析; 复杂网络模型; 互信息理论

中图分类号 U231+.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.010

Vulnerability Analysis of Metro System Based on Complex Network Model

WANG Xiliang, LI Jiyao, LIAN Mengke, SUN Zhi-jing

Abstract Based on interference events that are influencing metro system vulnerability, directional complex network model of interference events is constructed. By using analytical indicators including network density, average route length, degree and degree distribution, and clustering coefficient, topological characteristics analysis is conducted on complex network. Analytical results show that only few key nodes can directly affect metro vulnerability. By adopting mutual information theory of complex network, information calculation and importance evaluation are conducted for interference events directional complex network nodes, and to further recognize important nodes. Evaluation results show that the key factors influencing metro system vulnerability is the station passenger flow volume, vehicle system and equipment system, and corresponding measures can be adopted to improve metro operation safety.

Key words metro; operation safety; vulnerability analysis; complex network model; mutual information theory

Author's address School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, 050043, Shijiazhuang, China

地铁运行环境以地下空间为主, 环境较为封闭, 安全事故一旦发生, 极易造成较大的人员伤亡和财产损失。

目前, 关于轨道交通系统安全, 国内外专家已有了丰富的研究成果。文献[1]提出了轨道交通事故延误的影响因素, 解释了每个因素的异质性。文献[2]通过对地铁车辆故障数据进行分析, 建立了车辆故障模型。文献[3]对城市轨道交通系统的可靠性进行了分析, 得出了提高可靠性的方法。文献[4]从北京轨道交通网络结构出发, 构建了网络权重矩阵, 定义了四种故障模型。文献[5]采用危险与可操作性分析方法建立了灾害链网络模型, 反映灾害事件的传播关系。文献[6]对地铁运营风险传播规律进行研究, 为运营部门制定了风险防范措施。文献[7]基于复杂网络理论构建武汉市地铁网络的拓扑结构模型, 研究了地铁网络的鲁棒性。文献[8]建立基于 ANP(网络层次分析法)的地铁系统脆弱性仿真模型, 模拟不同投资方案对地铁系统脆弱性的影响趋势。

地铁运营安全的研究大多以事故预防为主。虽有部分学者已经将复杂网络理论应用于轨道交通领域, 但大多数仅对轨道交通线网进行研究, 找出关键站点, 却较少涉及到地铁系统本身。

只有找出地铁系统的薄弱环节, 才能采取针对性措施来降低系统的脆弱性, 从而有效减少事故的发生。本文从地铁系统整体出发, 建立复杂网络模型, 基于模型中节点间的相互关系进行地铁系统脆弱性分析, 找到影响系统脆弱性的关键性干扰事件, 为地铁安全性措施的选择提供参考。

1 复杂网络理论及重要性评估方法

1.1 复杂网络理论

复杂网络模型早期应用于社会学研究, 后来逐渐应用于自然科学、生物学、工程科学等领域的研究。复杂网络模型通过网络分析的方法来发现复

杂系统中的共通规律^[8],其主要分析指标有网络密度、平均路径长度、度和度分布,以及聚类系数^[9]。

1.1.1 网络密度

网络密度是在实际线路和网络理论最大线路的比值,直接说明线路中各节点的连接程度。在有 N 个节点和 M 条边的复杂网络模型中,网络密度 D 为:

$$D = \frac{M}{N(N-1)} \quad (1)$$

1.1.2 度和度分布

网络中与某节点关联的边数为该节点的度,反映节点在网络中的影响力。节点的度越大,其重要性越高。对于有向网络来说,节点的度分为出度和入度:出度是由该节点指向其他节点,入度则是由其他节点指向该节点。

1.1.3 平均路径长度

路径长度是指任意两点之间的最短距离。所有节点间的路径长度平均值就是网络的平均路径长度,记作 L 。有:

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in V(i \neq j)} d_{ij} \quad (2)$$

式中:

d_{ij} ——节点 i 和节点 j 间的距离。

1.1.4 聚类系数

聚类系数是实际节点连接的边数与节点可能出现的连接边数之比,反映网络内的复杂程度。有向网络中,如节点 i 的度为 k_i ,则聚类系数 C_i 为:

$$C_i = \frac{2M}{k_i(k_i-1)} \quad (3)$$

1.2 基于互信息理论的网络节点重要性评价方法

在有向网络中,边的两端节点之间进行单向数据通信,则节点可能在输出信息的同时又接收信息。节点 i 的出边概率为:

$$P_{i \rightarrow j} = \frac{1}{k_{i,\text{out}}} \quad (4)$$

式中:

$k_{i,\text{out}}$ ——节点 i 的出度。

同时节点 j 对应的入边概率为:

$$P_{l \rightarrow j} = \frac{1}{k_{j,\text{in}}} \quad (5)$$

式中:

$k_{j,\text{in}}$ ——节点 j 的入度。

在整个复杂网络模型中,若任意节点 i 与 j 之间存在连接路径,则有相互的信息传递,存在互信息;

若 i 与 j 之间没有连接路径,则其互信息为 0。即:

$$I_{(i \rightarrow j)} = \begin{cases} \ln \frac{1}{P_{i \rightarrow j}} - \ln \frac{1}{P_{l \rightarrow j}} & \\ 0 & \end{cases} = \begin{cases} \ln \frac{k_{i,\text{out}}}{k_{j,\text{in}}} & \\ 0 & \end{cases} \quad (6)$$

任意节点 i 的信息量 $I_{(i)}$ 定义为所有 i 指向的节点互信息之和,减去所有节点指向 i 节点的互信息之和^[12],即:

$$I_{(i)} = \sum_{j \in V_{i,\text{out}}} I_{i \rightarrow j} - \sum_{l \in V_{i,\text{in}}} I_{l \rightarrow i} \quad (7)$$

在整个网络中, $\sum I_{(i)} = 0$ 。 $I_{(i)}$ 越大,节点 i 的重要性越强。如 $I_{(i)}$ 为负值,则节点 i 不重要。

2 影响地铁脆弱性的复杂网络模型

2.1 影响地铁系统脆弱性的干扰事件

从“人、机、管、环”四方面出发,综合线路和应急管理的影响,基于国内外自 2000 年以来的 134 例地铁运营事故,本文整理出影响地铁系统脆弱性的干扰事件,见表 1。

表 1 地铁运营干扰事件表

编号	干扰事件	编号	干扰事件
V1	危险品携带	V12	车站内信号故障
V2	破坏车辆和车站设备	V13	列车脱轨
V3	车厢内吸烟	V14	电梯故障
V4	动用紧急逃生用品	V15	屏蔽门故障
V5	乘客或物品意外坠入轨道	V16	列车紧急停车
V6	关门铃响后继续上下车	V17	缺少相关管理规章制度
V7	拥挤踩踏	V18	没有安全刹车距离
V8	卧轨自杀	V19	员工操作失误
V9	列车与列车相撞	V20	火灾
V10	车站乘客量过大	V21	爆炸
V11	闭路监控系统未能发挥作用	V22	恐怖袭击

2.2 干扰事件复杂网络模型的构建

干扰事件之间的关系复杂。网络脆弱性的激发是由一系列的干扰和本身系统薄弱环节共同作用而导致的。以地铁事故研究为基础,采用事件链法分析地铁事故成因,明确干扰事件的相互影响关系,确定了 33 条事故链。

将连接矩阵复杂网络的初始数据输入网络分析 pajek 软件中,生成干扰事件有向复杂网络模型(以下简为“干扰事件网络”),如图 1 所示。

2.3 干扰事件网络的拓扑特征分析

干扰事件网络有 22 个节点(干扰事件)和 33 条边(事故链)。从网络密度、度和度分布、平均路径长度及聚类系数等 4 个方面分析网络的拓扑特征。

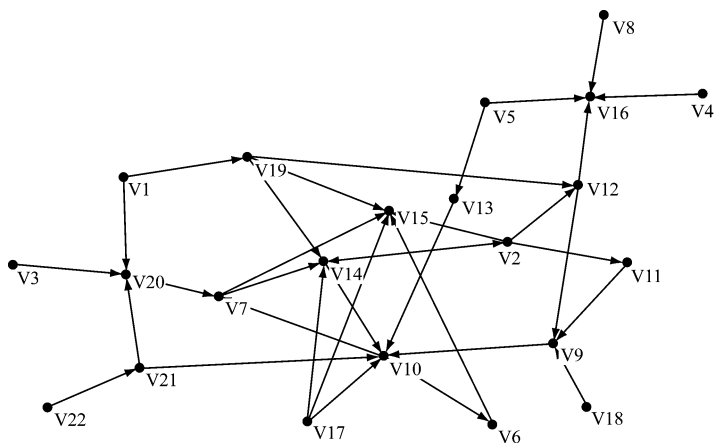


图1 地铁系统干扰事件网络图

2.3.1 网络密度

由式(1)计算可得, $D = 0.0996$ 。由此判断, 干扰事件网络为稀疏网络, 整体网络连接程度较低, 故一旦发生新的干扰事件, 也只会对少数原有事件产生影响。

2.3.2 度和度分布

根据复杂网络模型计算出度和入度, 结果如图2所示。由计算结果可知: V2 为干扰事件网络中出度最大的干扰事件, 其出度为4, 最易影响其他干扰事件的发生; V10 和 V15 为干扰事件网络中入度最大的干扰事件, 其入度均为5, 最易受其他事件干扰而发生, 进而影响地铁运营, 是地铁系统的最脆弱环节; V14 和 V16 的入度为4, 也是地铁系统的脆弱环节。

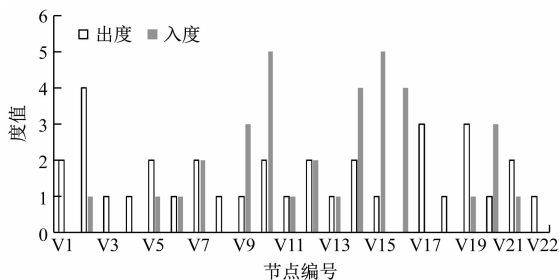


图2 干扰事件网络节点的出度及入度统计图

在干扰事件网络中, 度平均值为1.59, 说明每个干扰事件都会与其他的1.59个事件有联系。根据方差计算结果, 出度方差为0.58, 入度方差为2.95, 说明直接影响地铁脆弱性的干扰事件比较集中, 初始干扰事件比较复杂。

2.3.3 平均路径长度

通过 pajek 网络分析得到, 整体干扰事件网络共有236条连通路径, 平均路径长度为3.41。这说

明, 不同干扰事件仅通过约4次连接就可以相互影响, 而一些相对孤立的干扰事件也会通过中间事件来建立相互连接。在复杂网络模型中, 最大路径长度为9, 网络直径为9, 说明干扰事件最多需要9步即可触发另1件干扰事件。

2.3.4 聚类系数

聚类系数反映了节点的聚集情况。各干扰事件的聚类系数及其变化趋势曲线如图3所示。计算可得, 平均聚类系数为0.042。这说明, 每5个节点只有1条连接边, 而这5个节点聚类系数值缺失。图3中部分节点聚类系数为0, 说明网络中节点联系不是很紧密。

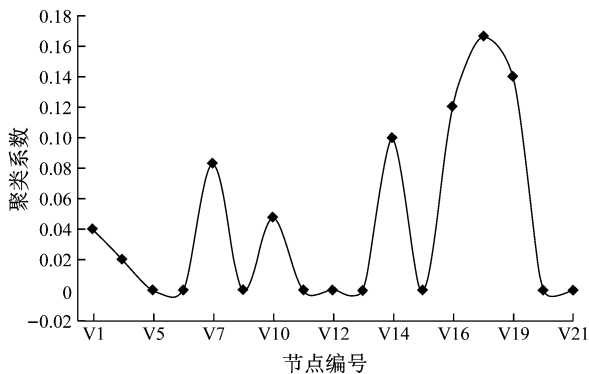


图3 干扰事件网络聚类系数及其变化图

2.4 基于互信息的节点重要性评价

为进一步确定干扰事件网络中节点的重要程度, 得出影响地铁系统脆弱性的关键因素, 本文采用基于互信息的节点重要性评价方法对节点重要性进行评估。

干扰事件网络有22个节点。采用改进的互信息评价方法, 计算相连节点间的互信息。由式(7)可得各节点的信息量, 并根据节点的信息量评价节

点的重要程度,进而确定影响地铁脆弱性的关键节点因素。节点信息量统计结果见表 2。

表 2 节点信息量统计表

节点编号	信息量统计	节点编号	信息量统计
V1	0.693	V12	-2.890
V2	1.856	V13	-2.303
V3	-1.099	V14	1.045
V4	-1.386	V15	3.771
V5	0	V16	4.159
V6	-2.303	V17	-1.309
V7	-1.609	V18	-1.099
V8	-0.288	V19	-1.086
V9	0.405	V20	0.811
V10	6.438	V21	-1.322
V11	-2.485	V22	0

由表 2 可知:相对于其他节点,干扰事件 V10、V16 和 V15 是信息量值最大的,其重要性也相应最大,可看作整个网络中最重要节点;V2、V14、V20 及 V9 是信息量值较大的,可看作网络中的二级重要节点;其余节点因其信息量均等于或小于 0,可以认为是不太重要的网络节点。

在整个干扰事件网络中,最重要节点 V10、V16 及 V15 分别来自于乘客影响、车辆及设备。由此推论,对整个地铁系统脆弱性影响最大的因素为客流、车辆系统及设备系统。

2.5 针对性的改进措施

基于地铁系统脆弱性分析结果,可采取相应的针对性措施,提高地铁运行的安全性。

1) 在地铁运营过程中,为避免出现车站内客流过大现象,运营方可在路口或客流量较大的公共场所设立信息提示牌,以提示乘客附近地铁站的拥堵状况,也可通过媒体网络实时发布地铁车站客流状态,以便乘客能选择最优的乘车线路。在地铁车站增加的指示牌和安全通道标记,还能帮助乘客在紧急情况下找到安全路径。

2) 应做好地铁车辆及设备的相关维修和养护工作,做好车辆及设备的定期维护工作,及时发现设备故障。当车站乘客较多时,应做好客流组织,

避免出现设备过度损耗。

3 结语

本文从地铁运营系统自身出发,对近几年的地铁事故进行分析,基于总结的影响地铁脆弱性的干扰性事件,构建了干扰事件复杂网络模型。通过对网络模型的拓扑结构分析发现,能影响系统脆弱性的干扰事件比较集中。

基于互信息理论,评价了干扰事件网络中节点的重要性。结果表明,影响地铁系统脆弱性的关键事件为车站客流量过大、列车紧急停车和屏蔽门故障,相应地,影响地铁系统脆弱性的关键因素为客流、车辆系统及设备系统。针对这一结论,提出了针对性的改进措施,以改善地铁运行安全。

参考文献

[1] AGBELIE B, LIBNAO K. Unobserved heterogeneity analysis of rail transit incident delays[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice,2018,117:39.

[2] YIN H, WANG K, QIN Y, et al. Reliability analysis of subway vehicles based on the data of operational failures[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017(1): 212.

[3] 何天健, 柏赞, 蔡浩, 等. 城市轨道交通系统的运营服务可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017(6):1.

[4] 陈峰, 胡映月, 李小红, 等. 城市轨道交通有权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.

[5] 李晓璐, 于昕明, 雷方舒, 等. 城市轨道交通系统灾害链网络模型构建与评价[J]. 中国安全科学学报, 2018(6): 183.

[6] 陈文瑛, 杜艳洋, 张艺凡, 等. 基于复杂网络的地铁运营风险传导规律研究[J]. 安全与环境工程, 2017(3):173.

[7] 甘俊杰, 聂规划, 徐迪. 武汉市地铁网络复杂特性与鲁棒性研究[J]. 安全与环境工程, 2018(6):120.

[8] 郝倩雯, 郭庆军, 贾哲. 基于 ANP-SD 的地铁系统脆弱性仿真分析[J]. 铁道标准设计, 2018(10):118.

[9] 汪小帆. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

[10] 宋亮亮, 李启明, 陆莹, 等. 城市地铁系统脆弱性影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2016(5):64.

[11] 宫剑, 沈吟东. 基于层次分析法的地铁站点脆弱性评价[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2016(5):519.

(收稿日期:2019-08-27)