

文章编号: 1003-1421(2026)08-0040-11

引用格式: 曾潮阳, 刘平. 基于复杂网络的城市轨道交通系统突发事件多层灾害链研究[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(8): 40-50.
ZENG Chaoyang, LIU Ping. Research on Multi-Layer Disaster Chain of Emergencies in Urban Rail Transit Systems Based on Complex Networks[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 40-50.

基于复杂网络的城市轨道交通系统突发事件 多层灾害链研究

曾潮阳^{1, 2}, 刘平¹

(1. 兰州理工大学 土木与水利工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃建筑职业技术学院,
甘肃 兰州 730050)

摘要: 城轨系统作为现代化城市的生命线工程, 其运营过程中发生灾害时, 经过灾害环境孕育, 引发次生灾害, 形成灾害链。为了更好地掌握城轨系统灾害链带来的风险, 基于国内457起城轨系统事故案例, 归纳形成17类典型原生灾害事件, 结合城轨系统线路层、站台层和站厅层的空间结构特征, 构建出多层城市轨道交通系统灾害链网络模型。进一步选取节点度、中介度、紧密度和聚类系数为评价指标, 采用层次分析法确定指标权重, 对多层灾害链网络节点综合重要性进行评价。结果显示所构建的灾害链网络模型能够反映出灾害事件的传播关系, 其中, 设备故障、乘客不安全行为、大面积停电、水灾和火灾等节点综合重要性较高, 是灾害链传播中的关键节点, 应作为运营安全管理和应急防控的重点对象。研究结果可为城轨系统分层分区风险识别、关键节点管控及系统韧性提升提供参考。

关键词: 城市轨道交通系统; 灾害链; 复杂网络; 网络评价; 传播关系

中图分类号: U298 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251027003

Research on Multi-Layer Disaster Chain of Emergencies in Urban Rail Transit Systems Based on Complex Networks

ZENG Chaoyang^{1, 2}, LIU Ping¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Gansu Vocational College of Architecture, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: As lifeline engineering in modern cities, when disasters occur during the operation of urban rail transit systems, they induce secondary disasters through the incubation of the disaster environment, forming disaster chains. To better grasp the risks brought by disaster chains in urban rail transit systems, based on 457 accident cases of urban rail transit systems in China, 17 categories of typical primary disaster events were summarized, and combining the spatial structural characteristics of the line layer, platform layer, and concourse layer of urban rail transit systems, a multi-layer disaster chain network model of urban rail transit systems was constructed. Furthermore, degree centrality, betweenness centrality, closeness centrality, and clustering coefficient were selected as evaluation indicators, and the analytic hierarchy process was used to

收稿日期: 2025-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(72461019)

determine the indicator weights to evaluate the comprehensive importance of nodes in the multi-layer disaster chain network. The results show that the constructed disaster chain network model can reflect the propagation relationships of disaster events, among which nodes such as equipment failure, unsafe passenger behavior, large-scale power outage, flood, and fire have high comprehensive importance and are key nodes in disaster chain propagation, which should be regarded as priority targets for operational safety management and emergency prevention and control. The research results can provide a reference for hierarchical and regional risk identification, key node control, and system resilience improvement of urban rail transit systems.

Keywords: Urban Rail Transit System; Disaster Chain; Complex Network; Network Evaluation; Propagation Relationship

0 引言

城市轨道交通系统(以下简称“城轨系统”)在城市发展中起着关键作用,能够有效缓解交通出行压力,同时具有高效、环保等特点。随着近年来城轨系统的高速发展,其运营阶段险性事件也不断增多,且灾害事件往往带来次生、衍生灾害事件,形成灾害链,进一步增加风险防控的难度。此外,城轨系统自身结构复杂,在空间结构上划分为多个空间区域,不同区域的灾害事件也不尽相同,这也给应急处理带来了一定的困难。因此,为保障城轨系统安全运行,如何识别城轨系统灾害链风险,深入分析其不同区域的演变规律,是城轨系统运营管理阶段急需解决的问题。

国内外学者早期对于城轨系统突发事件的研究主要集中在单一灾害事件的致灾因子,如火灾^[1-2]、大客流^[3]、洪涝灾害^[4]和设备故障^[5]等。但是城轨系统内部结构复杂,在运营过程中容易受到多种因素的影响,遭受突发灾害时,极易造成延误、中断或其他灾害。因此,学者逐渐开始重视灾害链的研究,并结合复杂网络、贝叶斯网络等对灾害链进行定量化评价,开始关注系统内风险因素的关联性和传递性,刘爱华等^[6]将灾害链分为发散式、集中式、交叉式等。Chen等^[7]运用系统工程理论和方法,构建了城轨系统链式风险识别模型。李浩然等^[8]以灾害学为基础,统计了灾害形成的原因,分析其特征,建立水灾灾害链模型。李晓璐等^[9]以历史数据为支撑,构建灾害链网络模型,选取复杂网络部分抗毁性指标进行边的评价。Zhou等^[10]基于事故能量释放理论和复杂网络模型研究了地铁坍塌事故的作用机理,用于预防事故网络中的次生和衍生事故的发生。

现有成果提升了城轨系统运营管理水平,但其系统复杂、功能区域多样,不同突发事件灾害链的成因与演化规律存在差异。单一灾害链网络难以真实揭示灾害链的涌现过程与演化机理,且多层关联网络研究较为不足。基于近30年457个国内城轨系统灾害链案例,结合城轨系统空间结构布局分析,构建突发事件多层灾害链网络模型。通过计算网络节点指标,识别灾害链风险并分析其演化规律,为线路层、站台层和站厅层安全管理及韧性提升提供参考。

1 城轨系统灾害链的特点及复杂网络理论

1.1 城轨系统灾害链的特点

Menoni^[11]对灾害链做了最早的定义,郭增建等^[12]对灾害链定义进行完善,指出灾害链是不同灾害事件互相作用的结果,某一初始灾害的发生改变了环境条件,引发另一灾害事件的发生。根据灾害系统理论^[13],致灾因子、孕灾环境和承灾体三者是构成灾害的要素,而灾害链是某一灾害发生引起孕灾环境的变化,产生了新的致灾因子,新的致灾因子作用于其他承灾体,继而引发了次生灾害。

城轨系统是一个复杂且庞大的系统,包含土建、车辆、电气、通信与信号、自动化技术、运营管理、安全和环境等专业;从技术组成来看,包含轨道、车站、车辆段三大基础设施和列车自动控制、供电监控、自动售检票等系统。因此,城轨系统的致灾因子十分复杂,任何一个节点发生异常,都有可能引发灾害。同时,城轨系统的空间较为密闭及狭窄,其孕灾环境非常敏感,灾害事件发生后释放的能量极易扰动原有环境的稳定性。城轨系统属于复杂巨系统,作为承灾体可以分为人员、机械、基础和环境等,而这些承灾体在另一方面也可

以成为致灾因子。城轨系统形成的灾害链往往具有明显的放大效应^[14]，且往往有3个以上的灾害事件节点，比如韩国大邱市地铁中央路站火灾事故，就发生了“火灾—停电—拥挤踩踏”灾害链，导致了重大伤亡。

此外，城轨系统突发事件灾害链具有动态演化的特征。在时间维度方面，具有快速链式反应特性，如东京沙林毒气事件中，毒气扩散6 min内即发生踩踏事故。在空间维度方面，具有空间层级性传播，灾害链可沿“站点—线路—网络—城市系统”进行扩散，站点级方面初始事件(如火灾)在密闭站厅内快速蔓延(热辐射、烟雾扩散)；线路级方面故障通过轨道、供电网等线性设施传播(如2011年上海地铁10号线追尾事故中，信号系统故障导致全线多列车紧急制动)；网络级方面跨线路的客流拥堵(如某线路中断导致相邻线路超负荷)；城市级方面交通瘫痪引发城市经济与社会秩序连锁反应(如2021年郑州暴雨导致地铁停运，城市交通网络崩溃)。针对不同的空间区域，具有空间传播路径的依赖性，比如发生火灾时，地下隧道形成烟囱效应，加速火灾烟雾的纵向扩散；排水系统失效时，积水沿轨道坡度向低处汇集，如郑州地铁5号线水灾中，积水从停车场倒灌至正线隧道。因此，系统识别城轨系统突发事件灾害链风险，并分析灾害链风险在时间及多层空间的演化过程及规律显得尤为重要。

1.2 复杂网络理论

复杂网络是具有一定数量的节点和连边的拓扑结构的模型^[15]。目前，复杂网络被应用于许多领域，如临床科学^[16]、人工智能^[17-18]、环境科学^[19]、信息科学^[20]等。复杂网络结合了规则网络和随机网络的特点，其小世界特性^[21]和无标度特性^[22]是必不可少的。小世界特性是指复杂网络具有相对较小的平均最短路径和较大的聚类系数^[23]。而轨道交通灾害的传播具有类似于小世界的特征，遵循了一定的规律。

构建复杂网络的建模方法主要有：Space L，Space B，Space P和Space C。学者们常用Space L法研究网络的脆弱性，这种建模方法也适用于城轨系统。具体方法就是将城轨系统灾害事件视为节点，

灾害间的引发关系视为连边，以此建立城轨系统灾害链的复杂网络模型，展示灾害链的实际连接状态。

1.3 多层网络理论

近年来，对复杂网络的研究方向主要集中在单层复杂网络，但随着研究的深入，单层网络的局限性愈加显现，因为其忽略了系统之间存在的相互作用关系，例如不同航空公司下的航线网络^[24]。多层网络是由2个或2个以上的单一网络以及网络间的连接构成，大部分学者将多层网络分为多维型、依存型及其他类型^[25]。

在多维型多层网络结构中，每一层均由单一复杂网络构成，其中各层节点间存在交集，即不同层间共享部分节点，且层间连接仅限于这些共享节点。与此不同，依存型多层网络允许不同层的节点间无交集，即层间节点可以独立存在并相互连接，同时单个节点亦可与多个节点形成连接关系。此外，多层网络的范畴还包括含时网络和超网络等结构。含时网络通过引入时间维度，根据系统状态在不同时间点的变化来定义网络层。超网络则表现为网络层之间存在多种相互作用关系，包括但不限于关联、依存和嵌套关系。

2 城轨系统灾害链复杂网络建立

2.1 城轨系统突发事件分析

由于城轨系统运营事故数据没有官方发布，因此通过搜索文献、网络、公众号、微博等平台，搜集国内城轨系统灾害链案例，分析其原生灾害的类型。搜索政府于各大媒体官方网站发布的信息，搜索相关文献，共搜集了2000—2023年国内457件城轨系统事故案例，分析确定原生灾害的类型；参考《城市轨道交通运营安全风险分级管控和隐患排查治理管理办法》和《城市轨道交通主要运营险性事件清单》，结合事故致因、影响范围和损失程度对事故进行分类，比如爆炸需区分充电宝自燃与恶意爆炸，毒气事件限定为乘客携带有毒物品泄漏等，总结出原生灾害共计17项，将原生灾害清单表示为集合V，原生灾害链集合如表1所示。

2.2 城轨系统突发事件共现矩阵构造

灾害事件总数为457件，按照17类原生事故进行统计，构建17×17的矩阵，将各事故发生的次数

表1 原生灾害链集合
Tab.1 Set of primary disaster chains

编号	名称
V1	爆炸
V2	车辆重大故障
V3	乘客不安全行为
V4	大面积停电
V5	电梯和自动扶梯重大故障
V6	毒气
V7	工作人员操作失误
V8	火灾
V9	夹人夹物动车造成乘客伤亡
V10	列车冲突
V11	列车挤岔
V12	列车脱轨
V13	设备故障
V14	水灾
V15	土建结构和基础严重病害
V16	信号系统重大故障
V17	异物入侵

填入对角线。同时统计原生事故发生后,引发的次生事故的次数,比如统计样本中,共发生了7次列车冲突事故,其中有6次发生了车辆重大故障次生事故,1次引发了大面积停电事故。将统计数据填入到相对应的元素,得到城轨系统灾害事件共现矩阵如表2所示。表2中每个格子的数据表示,在同

一地点,相应行对应的事件发生后,相应列对应事件发生的次数。比如第10行第2列表示,同一事故地点,若有列车冲突发生,那么会引发车辆重大故障的情况有6起。

根据所获得的共现矩阵,将对角线元素改为0,非零元素改为1,可以得到城轨系统灾害事件的邻接矩阵,城轨系统灾害事件邻接矩阵如表3所示。

根据表3,生成城轨系统灾害链复杂网络图,城轨系统灾害事件传播关系网络如图1所示。图1可以直观地反映出各灾害之间的传播关系,V11,V12,V15,V16,V17与其他节点连接相对较少,与V2,V3,V4,V10,V13,V14相连的节点较多,这反映出这些灾害与其他灾害联系较为紧密。在复杂网络中,如果节点的出入度都不为0,说明该节点为中间节点,比如V14;如果节点的入度为0,那么该节点是原生灾害,不会由其他节点灾害引发,比如V11。

2.3 城轨系统突发事件引发概率矩阵构造

得到各灾害之间的网络关系图后,为网络的边赋权,来描述灾害之间的关联度。在灾害链网络中,灾害事件的共现率反映节点之间的关联度。利用Jaccard指数矩阵来描绘灾害间的共现率,Jaccard计算公式如下。

表2 城轨系统灾害事件共现矩阵
Tab.2 Co-occurrence matrix of disaster events in urban rail transit systems

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17
V1	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
V2	—	69	43	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—
V3	2	—	95	3	—	—	—	2	25	—	—	—	—	—	—	—	—
V4	—	—	—	19	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V5	—	5	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V6	—	1	—	—	—	2	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
V7	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
V8	1	—	—	1	—	—	—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V9	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	3	—	—	—	—
V10	—	6	—	1	—	—	—	—	—	7	—	—	—	—	—	—	—
V11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	1	—	—	—	—	—
V12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	1	—	—	—	—
V13	1	—	1	4	—	—	—	5	—	—	—	—	74	1	—	—	—
V14	—	—	2	3	—	—	—	—	—	—	—	—	1	57	1	—	—
V15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	3	—	—
V16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	83	—
V17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	1	8

表3 城轨系统灾害事件邻接矩阵
Tab.3 Adjacency matrix of disaster events in urban rail transit systems

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17
V1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
V2	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
V3	1	—	—	1	—	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
V4	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V5	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V6	—	1	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
V7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
V8	1	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
V10	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
V12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
V13	1	—	1	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	1	—	—	—
V14	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	1	—	—
V15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—
V16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
V17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	1	—

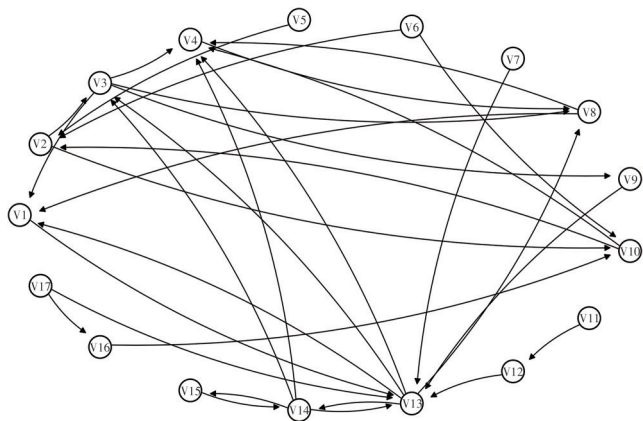


图1 城轨系统灾害事件传播关系网络

Fig.1 Propagation relationship network of disaster events in urban rail transit systems

$$J_{AB} = \frac{c_{AB}}{c_A + c_B - c_{AB}} \quad (1)$$

式中： J_{AB} 为灾害事件A和B的共现率，且 $0 \leq J_{AB} \leq 1$ ； c_{AB} 为灾害事件A和B的共现频次； c_A ， c_B 分别为灾害事件A，B出现的频次。

根据公式(1)计算，得到城轨系统灾害链之间的引发概率，从而得到Jaccard指数矩阵，灾害事件引发概率矩阵如表4所示。

以Jaccard指数矩阵中的共现率为城轨系统复杂网络模型中的边的权重，构建加权的城轨系统复

杂网络模型，城轨系统灾害事件传播关系网络图如图2所示。图2可以直观地反映灾害之间的发生概率，图中概率是通过统计数据求得，受限于统计样本的大小，部分概率存在着偏大的问题，但是可以在一定程度上反映灾害之间的引发关系。

3 城轨系统灾害链多层网络建立

城轨系统不同站点的功能区在空间上的划分各有不同，必备的构造有线路层、站台层和站厅层。部分站点还有设备层、商业层、换乘层和通道层等。上海轨道交通人民广场站结构示意图^[26]如图3所示，设计为地下3层结构，地下三层为2号线站台层；地下二层为2号线站厅层、1号线站台层、8号线站台层以及换乘通道；地下一层为1号线站厅层、2号线商业层、8号线站厅层以及换乘大厅。提取其网络层即为：线路层→站台层(地下三层)→站厅/站台/换乘层(地下二层)→站厅/商业层(地下一层)。为了简化研究，构建“线路层→站台层→站厅层”的多层城轨系统灾害链网络。由于各区域功能系统不同、设备设施不同，因此在不同区域上发生的灾害种类也不同，比如站厅层基本不可能发生列车冲突、列车脱轨和列车挤岔等灾害。因此先明确各个区域可能发生的灾害类型。

表4 灾害事件引发概率矩阵
Tab.4 Triggering probability matrix of disaster events

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17
V1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	—	—	—	—
V2	—	1	0.62	—	—	—	—	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—
V3	0.02	—	1	0.03	—	—	—	0.02	0.26	—	—	—	—	—	—	—	—
V4	—	—	—	1	—	—	—	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V5	—	0.45	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V6	—	0.5	—	—	—	1	—	—	—	0.5	—	—	—	—	—	—	—
V7	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	0.5	—	—	—	—
V8	0.14	—	—	0.14	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V9	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	0.3	—	—	—	—
V10	—	0.86	—	0.14	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
V11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.5	—	—	—	—	—
V12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.17	—	—	—	—
V13	0.01	—	0.01	0.05	—	—	—	0.07	—	—	—	—	1	0.01	—	—	—
V14	—	—	0.04	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	1	0.02	—	—
V15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.67	1	—	—
V16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	—	—	—	—	—	1	—
V17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.13	—	—	0.13	1

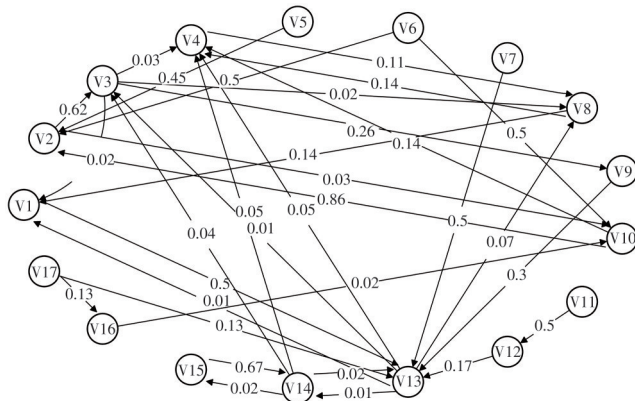
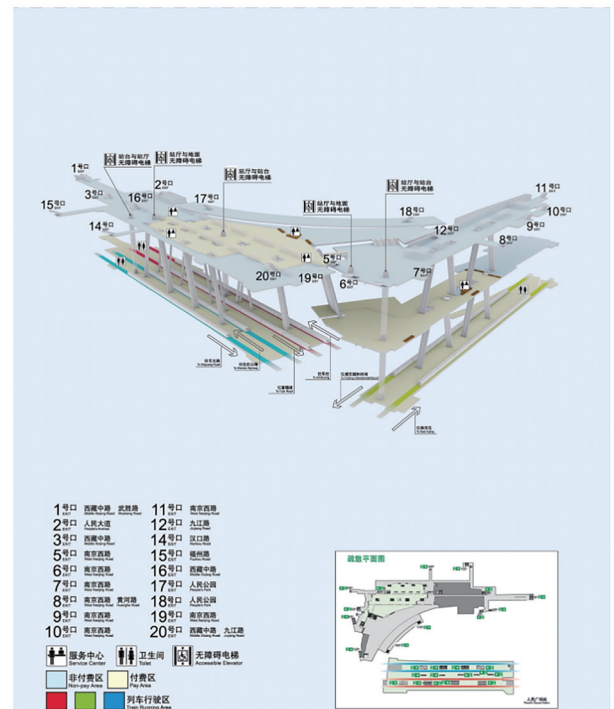


图2 城轨系统灾害事件传播关系网络图

Fig.2 Network diagram of disaster event propagation relationships in urban rail transit systems

线路层可能发生的灾害种类有：爆炸(V1)、车辆重大故障(V2)、乘客不安全行为(V3)、大面积停电(V4)、毒气(V6)、工作人员失误(V7)、火灾(V8)、夹人夹物动车造成乘客伤亡(V9)、列车冲突(V10)、列车挤岔(V11)、列车脱轨(V12)、设备故障(V13)、水灾(V14)、土建结构和基础严重病害(V15)、信号系统重大故障(V16)、异物入侵(V17)。

站台层可能发生的灾害种类有：爆炸(V1)、乘客不安全行为(V3)、大面积停电(V4)、电梯和自动扶梯重大故障(V5)、毒气(V6)、工作人员失误(V7)、



注：图片来自百度百科。

图3 上海轨道交通人民广场站结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of structure of People's Square Station in Shanghai Metro

火灾(V8)、夹人夹物动车造成乘客伤亡(V9)、设备故障(V13)、水灾(V14)、土建结构和基础严重病害

(V15)、信号系统重大故障(V16)、异物入侵(V17)。

站厅层可能发生的灾害种类有：爆炸(V1)、乘客不安全行为(V3)、大面积停电(V4)、电梯和自动扶梯重大故障(V5)、毒气(V6)、工作人员失误(V7)、火灾(V8)、设备故障(V13)、水灾(V14)、土建结构和基础严重病害(V15)、信号系统重大故障(V16)、异物入侵(V17)。

与站厅层连接的还有地面层，但是由于各个站点的地面层都不相同，因此本研究中不考虑灾害往地面蔓延的情况。

构建多层城轨系统灾害链网络时，为了简化模型，层与层之间只考虑同种灾害的传播关系，所收集样本中，同类灾害跨层传播概率为48%，比如线路层水灾→站台层水灾，参考多层网络层间连接权重的研究，传播的权重按照0.5计算。同时，权重在0.4~0.6范围内，经计算，节点综合重要性排序无显著变化，皮尔逊相关系数 ≥ 0.95 ，取值较为合理。综上，城轨系统多层网络模型如图4所示。

4 城轨系统多层灾害链网络评价

4.1 多层灾害链网络指标计算

4.1.1 度中心性

如果网络中的节点处在中心点，与其他节点发生的联系越多，代表其重要程度越高。节点度中心性^[27-28]计算公式如下所示。

$$D_{ci} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma_{ij} \quad (2)$$

式中： D_{ci} 为节点度中心性； σ_{ij} 为节点*i*与*j*之间的边的数目； N 为 w 网络节点的总数。

4.1.2 中介度中心性

节点的中介度中心性^[27]表示在网络中所有节点对的最短路径中，经过该节点的最短路径数目。计算公式如下所示。

$$B_{ci} = \sum_{s \neq i \neq v, s, t \in V} \frac{\sigma(s, t|v)}{\sigma(s, t)} \quad (3)$$

式中： B_{ci} 为节点中介度中心性； $\sigma(s, t)$ 为节点*s*与*t*之间的最短路径的总数； $\sigma(s, t|v)$ 为节点*s*到

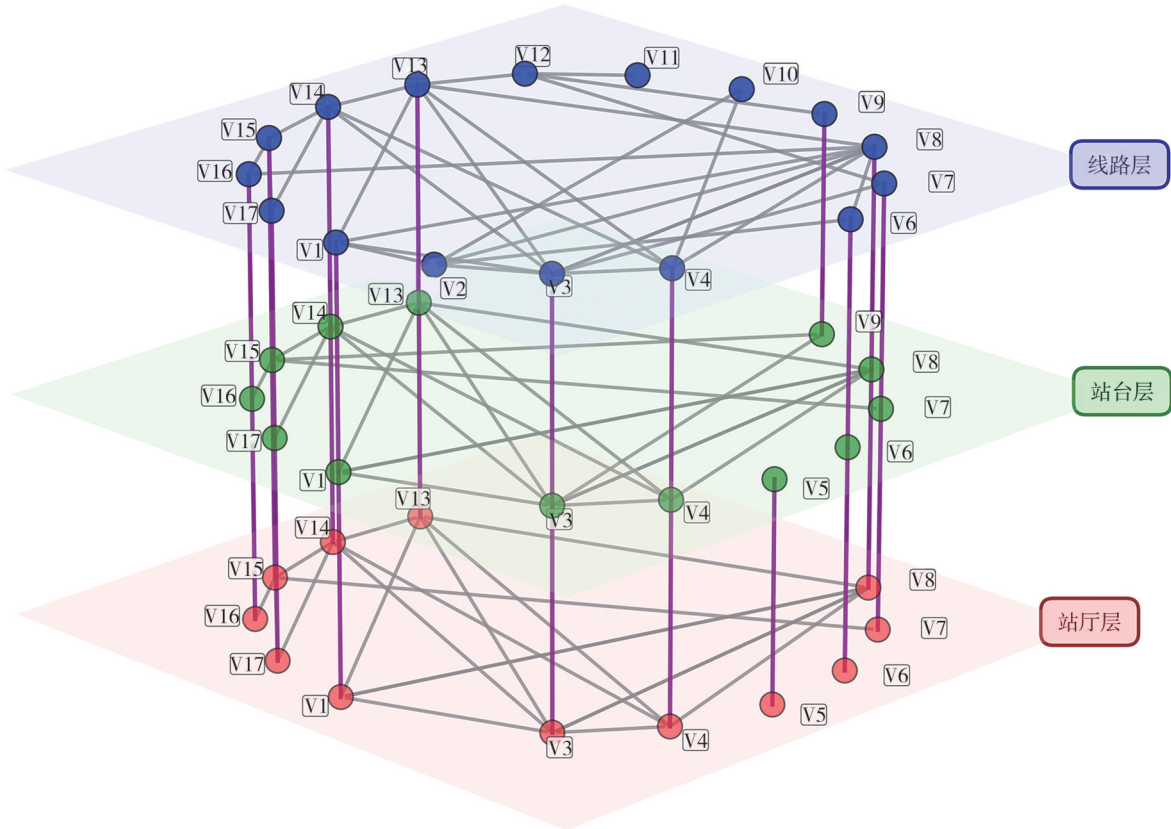


图4 城轨系统多层网络模型

Fig.4 Multi-layer network model of urban rail transit systems

节点 t 经过节点 v 的最短路径数目。

4.1.3 紧密度中心性

网络中与各节点联系路径最短的1个中心点, 计算公式如下所示。

$$C_{ci} = \frac{\sum_{j=1}^N d_{ij}}{N} \quad (4)$$

式中: C_{ci} 为节点紧密度中心性; d_{ij} 为节点 i 与 j 之间的最短路径; N 为网络节点的总数。

4.1.4 聚类系数

在网络中, 节点之间的紧密程度越高, 其聚类系数越高, 对应的灾害与其他灾害的联系越紧密, 代表其重要程度也越高。有向加权网络的聚类系数计算公式如下所示。

$$CO_i = \frac{1}{m_i(m_i - 1)} \sum_{j, k} \frac{D_{ci}}{s_i} \frac{w_{ij} + w_{ji} + w_{ki} + w_{ik}}{n_{ijk}} g_{ij} g_{ik} g_{jk} \quad (5)$$

式中: CO_i 为聚类系数; m_i 为与节点 i 直接相连的节点总数; D_{ci} 为节点 i 的总度数; s_i 为节点 i 的权重; w_{ij} 为节点 i 指向节点 j 的边的权重; w_{ji} 为节点 j 指向节点 i 的边的权重; w_{ki} 为节点 k 指向节点 i 的边的权重;

w_{ik} 为节点 i 指向节点 k 的边的权重; n_{ijk} 为节点 ij, ik 之间边的总数; g_{ijk} 为节点 i, j, k 构成的局部三元结构闭合判别项, 其取值可为0, 1, 2。

度中心性、中介度中心性、紧密度中心性和聚类系数分别从直接影响力、桥梁作用、信息传播效率、局部聚集性4个维度刻画节点在网络中的重要性, 都是复杂网络节点重要性评估的经典指标, 因此选取以上指标对网络进行分析, 确保评估全面性。分别利用式(2)—(5)计算网络的度中心性、中介度中心性、紧密度中心性和聚类系数指标, 节点度、中介度、紧密度和聚类系数计算结果如图5所示。

同时采用度中心性、中介度中心性、紧密度中心性和聚类系数4个指标对节点进行综合重要性分析对比, 采用专家调查法和层次分析法^[29]进行权重计算。共邀请10位轨道交通领域专家进行两两对比打分, 经一致性检验($CR < 0.1$)后确定最终权重。构造比较判断权重矩阵如表5所示。

根据所得的权重, 计算各灾害节点的综合重要性, 并按从大到小进行排列, 节点综合重要性计算如表6所示。

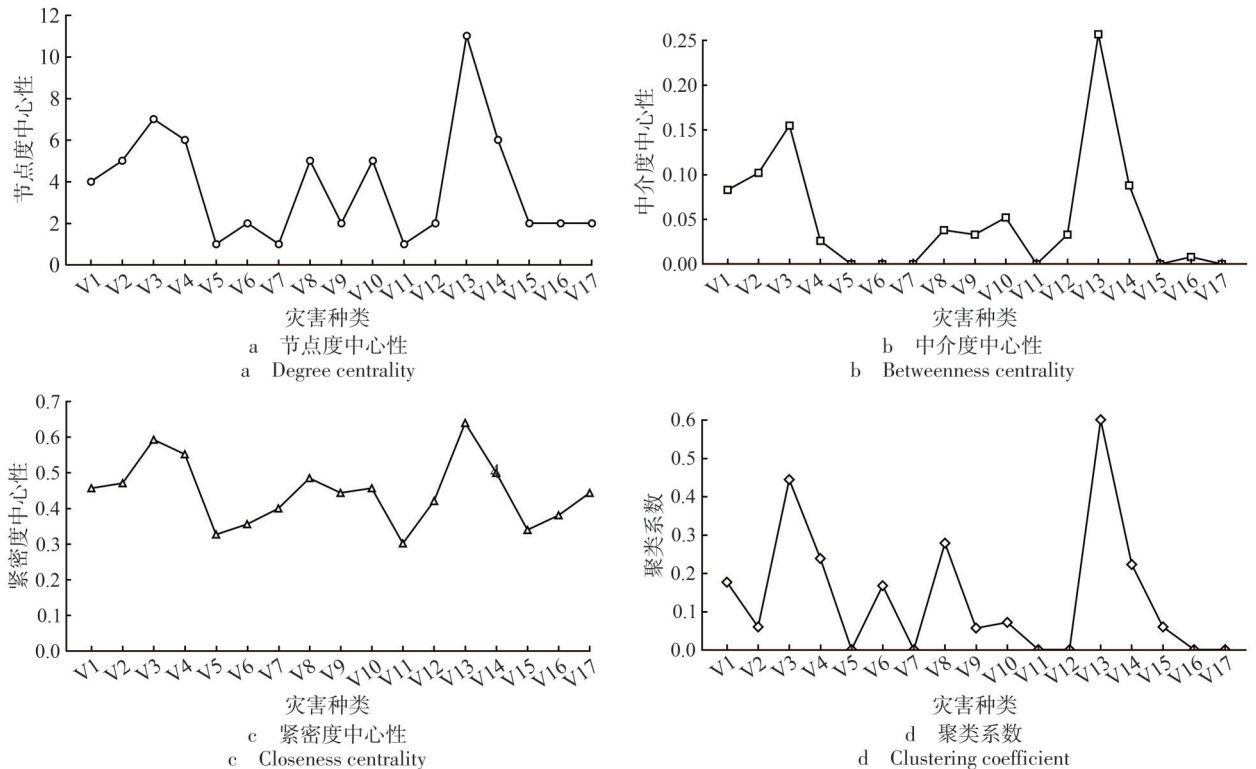


图5 节点度、中介度、紧密度和聚类系数计算结果

Fig.5 Calculation results for degree centrality, betweenness centrality, closeness centrality, and clustering coefficient

表5 判断权重矩阵
Tab.5 Judgment matrix for weight determination

评价指标	度中心性	中介度中心性	紧密度中心性	聚类系数	权重
度中心性	1	1	0.5	0.5	0.17
中介度中心性	1	1	0.5	0.5	0.17
紧密度中心性	2	2	1	1	0.33
聚类系数	2	2	1	1	0.33

4.2 多层灾害链网络综合评价

图5表明，各节点平均度值为3.76，灾害链网络中灾害事件之间的联系较为分散。其中，设备故障的度值、中介度、紧密度和聚类系数均较高，表明其与其他灾害联系紧密，是重点防控对象。乘客不安全行为、大面积停电、火灾和水灾也具有较高影响力，既容易引发其他灾害，也易受其他灾害影响。设备故障、乘客不安全行为、车辆重大故障和水灾具有较强中介作用；设备故障、乘客不安全行为、火灾和大面积停电与周边节点联系更为密切。

表6显示，设备故障综合重要性最高。由于城轨系统设备设施复杂，一旦发生故障可能引发严重后果，因此应加强设备质量管控、日常巡检和维护，发现损坏及时维修或更换，防止灾害扩散。乘客不安全行为综合重要性位居第2。城市轨道交通空间相对封闭且人员密集，乘客不安全行为若处置不当，易造成严重社会影响和经济损失。因此，应

加强工作人员培训，提高风险预判能力；完善围挡等安全设施；加强安全宣传，提升乘客安全意识。电梯和自动扶梯重大故障、列车挤岔综合重要性较低，但并不代表危险性低。尤其是电梯和扶梯作为站厅与站台的重要通道，一旦故障可能影响人员疏散，因此仍需加强日常维护。

从不同层级看，线路层应重点关注设备故障、列车冲突和信号系统重大故障。线路设备故障可能引发列车停运甚至冲突，应加强维护保养，并利用物联网等技术开展状态监测。列车冲突后果严重，需完善多重安全防护体系。信号系统故障可能导致冲突、脱轨等事故，应定期开展应急演练，提高司机和调度人员处置能力。站台层应重点关注乘客不安全行为、火灾和设备故障。站台人员密集，人机环境交互频繁，应通过广播、工作人员引导和高峰疏导降低风险。火灾易产生浓烟并引发恐慌，应确保消防设施完好、疏散指示清晰。站台设备故障，如屏蔽门、电梯、照明故障，可能阻断客流和疏散通道，应重点维护。站厅层应重点关注乘客不安全行为、设备故障和水灾。乘客携带违禁品、打架斗殴、破坏设施等行为可能扰乱秩序，应提升安检效率并加强与公安联动。站厅设备故障主要涉及售检票、安检和通风空调系统，应进行冗余设计，降低

表6 节点综合重要性计算
Tab.6 Calculation of comprehensive importance of nodes

序号	灾害事件	节点度	中介度	紧密度	聚类系数	综合重要性
V13	设备故障	11	0.257	0.64	0.6	2.323
V3	乘客不安全行为	7	0.155	0.593	0.444	1.559
V4	大面积停电	6	0.026	0.552	0.238	1.285
V14	水灾	6	0.088	0.5	0.222	1.273
V8	火灾	5	0.038	0.485	0.278	1.108
V2	车辆重大故障	5	0.102	0.471	0.059	1.042
V10	列车冲突	5	0.052	0.457	0.071	1.033
V1	爆炸	4	0.083	0.457	0.176	0.903
V6	毒气	2	0	0.356	0.167	0.513
V9	夹人夹物动车造成乘客伤亡	2	0.033	0.444	0.056	0.511
V17	异物入侵	2	0	0.444	0	0.487
V12	列车脱轨	2	0.033	0.421	0	0.485
V15	土建结构和基础严重病害	2	0	0.34	0.059	0.472
V16	信号系统重大故障	2	0.008	0.381	0	0.467
V7	工作人员操作失误	1	0	0.4	0	0.302
V5	电梯和自动扶梯重大故障	1	0	0.327	0	0.278
V11	列车挤岔	1	0	0.302	0	0.270

局部故障影响。水灾主要表现为雨水倒灌,需加强排水设计和防汛准备。

5 结论

基于国内457件城轨系统灾害事件,结合复杂网络与多层网络方法,构建了城轨系统突发事件灾害链网络模型,并计算节点度中心性、中介度中心性、紧密度中心性和聚类系数指标,综合分析其重要性。主要结论如下。

(1) 城轨系统突发事件灾害链具有明显的复杂关联特征,各类灾害并非孤立发生,而是通过直接或间接关系形成连续演化过程。网络分析结果表明,设备故障、乘客不安全行为、大面积停电和水灾等节点在灾害链中具有较高重要性,其影响范围广、传播能力强,易诱发次生或衍生灾害,是城轨系统运营安全管理中的重点防控对象。

(2) 多层灾害链网络能够更好地反映城轨系统不同空间层级中的灾害传播特征。线路层、站台层和站厅层在功能属性、人员分布和设备组成等方面存在差异,导致同一灾害类型在不同层级中的表现形式、致灾机理和次生影响并不完全相同。因此,运营安全防控不宜仅从单一网络或单一灾害类型出发,而应结合空间层级特征,制定分区分层的风险识别与防控策略。

(3) 本研究仍存在一定局限。受样本容量和案例信息完整性限制,部分灾害节点的重要性评价仍需进一步验证;同时,不同层级之间灾害链传播案例和实验支撑相对不足,对同一灾害类型在不同空间层级中的差异化刻画仍不够细致。后续研究可继续扩大案例样本,细化灾害类型在不同层级中的表现差异,并进一步完善跨层灾害传播模型,以提高灾害链网络分析的真实性和适用性

参考文献:

- [1] 王艳辉, 晋 君, 李 曼. 基于三角模糊因果图的城市轨道交通火灾事故分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(11): 22-26.
WANG Yanhui, JIN Jun, LI Man. Analysis of Urban Rail Transit Fire Based on Triangular Fuzzy Causality Diagram[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(11): 22-26.
- [2] ROH J S, RYOU H S, PARK W H, et al. CFD Simulation and Assessment of Life Safety in a Subway Train Fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 447-453.
- [3] PARAGIOS N, RAMESH V. A MRF-Based Approach for Real-Time Subway Monitoring[C]//IEEE. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Kauai, HI, USA: IEEE, 2003: 1.
- [4] 李辉山, 白 莲, 刘 平. 基于DNN神经网络的地铁洪涝灾害评估研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(12): 131-136.
LI Huishan, BAI Lian, LIU Ping. Research on Subway Flood Disaster Assessment Based on DNN Neural Network[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(12): 131-136.
- [5] HINZE J W, TEIZER J. Visibility-Related Fatalities Related to Construction Equipment[J]. Safety Science, 2011, 49(5): 709-718.
- [6] 刘爱华, 吴 超. 基于复杂网络的灾害链风险评估方法的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 466-472.
LIU Aihua, WU Chao. Research on Risk Assessment Method of Disaster Chain Based on Complex Network[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2015, 35(2): 466-472.
- [7] CHEN H Y, ZHANG L M, RAN L Y. Vulnerability Modeling and Assessment in Urban Transit Systems Considering Disaster Chains: A Weighted Complex Network Approach[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 54: 102033.
- [8] 李浩然, 欧阳作林, 姜 军, 等. 城市轨道交通灾害链演化网络模型及其风险分析: 以地铁水灾为例[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(2): 153-157.
LI Haoran, OUYANG Zuolin, JIANG Jun, et al. Urban Rail Transit Disaster Chain Evolution Network Model and Its Risk Analysis: Taking Subway Flood as an Example[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(2): 153-157.
- [9] 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, 28(6): 179-184.
LI Xiaolu, YU Xinming, LEI Fangshu, et al. Construction of Disaster Chain Network Model and Evaluation of Network Index for Urban Rail Transit System[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(6): 179-184.
- [10] ZHOU Z P, IRIZARRY J. Integrated Framework of Modified Accident Energy Release Model and Network Theory to Explore the Full Complexity of the Hangzhou Subway

- Construction Collapse[J]. Journal of Management in Engineering, 2016, 32(5): 05016013.
- [11] MENONI S. Chains of Damages and Failures in a Metropolitan Environment: Some Observations on the Kobe Earthquake in 1995[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 86(1-3): 101-119.
- [12] 郭增建, 秦保燕. 灾害物理学简论[J]. 灾害学, 1987, 2(2): 25-33.
GUO Zengjian, QIN Baoyan. Brief Discussion on Disaster Physics[J]. Journal of Catastrophology, 1987, 2(2): 25-33.
- [13] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7.
SHI Peijun. Theory and Practice on Disaster System Research in a Fourth Time[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 1-7.
- [14] JIAO L D, LUO Q D, LU H, et al. Research on the Urban Rail Transit Disaster Chain: Critical Nodes, Edge Vulnerability and Breaking Strategy[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 242: 109761.
- [15] LI N, HUANG Q, GE X Y, et al. A Review of the Research Progress of Social Network Structure[J]. Complexity, 2021, 2021(1): 6692210.
- [16] HOFMANN S G, CURTISS J. A Complex Network Approach to Clinical Science[J]. European Journal of Clinical Investigation, 2018, 48(8): e12986.
- [17] KAVIANI S, SOHN I. Application of Complex Systems Topologies in Artificial Neural Networks Optimization: An Overview[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 180: 115073.
- [18] SERGIOU C, LESTAS M, ANTONIOU P, et al. Complex Systems: A Communication Networks Perspective towards 6G[J]. IEEE Access, 2020, 8: 89007-89030.
- [19] NAZEMPOUR R, ALI SANIEE MONFARED M, ZIO E. A Complex Network Theory Approach for Optimizing Contamination Warning Sensor Location in Water Distribution Networks[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 30: 225-234.
- [20] LI Y F, GENG T, LI A, et al. BCNN: Binary Complex Neural Network[J]. Microprocessors and Microsystems, 2021, 87: 104359.
- [21] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective Dynamics of Small-World Networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [22] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [23] ZHANG L, WEI Q F, YUAN Y, et al. Knowledge Diffusion Simulation of Knowledge Networks: Based on Complex Network Evolutionary Algorithms[J]. Cluster Computing, 2019, 22(6): 15255-15265.
- [24] CARDILLO A, ZANIN M, GÓMEZ-GARDEÑES J, et al. Modeling the Multi-Layer Nature of the European Air Transport Network: Resilience and Passengers Re-Scheduling under Random Failures[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2013, 215(1): 23-33.
- [25] 张欣. 多层复杂网络理论研究进展: 概念、理论和数据[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(2): 103-107.
ZHANG Xin. Multilayer Networks Science: Concepts, Theories and Data[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(2): 103-107.
- [26] 王秀志, 张自根, 韩秋官. 上海市地铁2号线人民公园车站结构设计[J]. 地下工程与隧道, 1999(3): 13-19, 47.
WANG Xiuzhi, ZHANG Zigen, HAN Qiuguan. Structure Design of the People's Park Station of Shanghai Metro Line No. 2[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3): 13-19, 47.
- [27] 薛锋, 何传磊, 黄倩. 成都地铁网络的关键节点识别方法及性能分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(1): 93-99.
XUE Feng, HE Chuanlei, HUANG Qian. Identification of Key Nodes in Chengdu Metro Network and Analysis of Network Performance[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(1): 93-99.
- [28] 牟能冶, 康秋萍, 贾程方. 突发事件影响下的城市快递网络脆弱性评估[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 125-132.
MU Nengye, KANG Qiuping, JIA Chengfang. Vulnerability Assessment of Urban Express Networks under Influence of Emergencies[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12): 125-132.
- [29] 张乃禄. 安全评价技术: 3版[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.

(责任编辑 刘宁馨)