

## 城市轨道交通网络关键节点识别及级联抗毁性研究

于景飞<sup>1</sup>, 谢存宇<sup>1,\*</sup>

1. 内蒙古科技大学, 土木工程学院, 内蒙古 包头, 014000

**摘要:** 以上海市轨道交通网络为研究对象, 针对既有研究对客流等运行特征刻画不足的问题, 开展关键站点识别及级联失效条件下网络抗毁性分析。基于复杂网络理论构建 Space-L 拓扑模型, 从结构与功能两个维度构建站点重要度评价体系, 选取度中心性、接近中心性、介数中心性、特征向量中心性及节点客流比 5 项指标, 结合 CRITIC-VIKOR 方法实现站点重要度综合排序。在级联失效建模中, 以节点客流作为初始负载, 构建非线性容量—负载模型, 并引入基于剩余容量的择优分配策略实现失效节点负载重分配; 进一步引入网络全局流量加权效率与最大流量连通子图比例刻画网络抗毁性。结果表明: 静安寺站综合重要度最高, 体现结构与功能耦合优势; 随机攻击下网络性能下降较缓, 表现出一定鲁棒性; 而基于重要度的蓄意攻击导致网络效率快速衰减, 系统脆弱性显著增强; 当负载容忍系数  $\alpha=0.4$  时网络极为脆弱, 仅失效 4% 的关键节点就导致全网崩溃, 流量效率与连通比例骤降至 0.19% 和 1.8%; 随着  $\alpha$  增大, 各类攻击下的性能曲线均趋于平缓, 表明网络对随机故障和蓄意攻击的抵抗能力均得到增强。研究可为轨道交通网络关键节点识别及抗毁性优化提供理论依据。

**关键词:** 城市轨道交通; 复杂网络; 关键站点识别; 级联失效; 抗毁性; CRITIC-VIKOR 方法

## Identification of Critical Nodes and Cascading Robustness Analysis in Urban Rail Transit Networks

Jingfei Yu<sup>1</sup>, Cunyu Xie<sup>1,\*</sup>

1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia, 014000, China

**Abstract:** Taking Shanghai rail transit network as the research object, aiming at the problem of insufficient characterization of passenger flow and other operating characteristics in existing research, the identification of key stations and the analysis of network invulnerability under cascading failure conditions are carried out. Based on the complex network theory, the Space-L topology model is constructed, and the site importance evaluation system is constructed from the two dimensions of structure and function. The five indexes of degree centrality, closeness centrality, betweenness centrality, eigenvector centrality and node passenger flow ratio are selected, and the CRITIC-VIKOR method is used to realize the comprehensive ranking of site importance. In the cascading failure modeling, the nonlinear capacity-load model is constructed by using the passenger flow of the node as the initial load, and the optimal allocation strategy based on the residual capacity is introduced to realize the load redistribution of the failure node. Further, the network global traffic weighted efficiency and the maximum traffic connected subgraph ratio are introduced to characterize the network invulnerability. The results show that Jing'an Temple Station has the highest comprehensive importance, reflecting the coupling advantages of structure and function. Under random attack, the

network performance decreases slowly, showing a certain robustness. The deliberate attack based on importance leads to the rapid attenuation of network efficiency and the significant enhancement of system vulnerability. When the load tolerance coefficient  $\alpha = 0.4$ , the network is extremely fragile. Only 4 % of the key nodes fail, which leads to the collapse of the whole network, and the traffic efficiency and connectivity ratio drop to 0.19 % and 1.8 %. As  $\alpha$  increases, the performance curves under various attacks tend to be flat, indicating that the network's resistance to random failures and deliberate attacks is enhanced. The research can provide theoretical basis for key node identification and invulnerability optimization of rail transit network.

**Keywords:** Urban rail transit; Complex network; Critical station identification; Cascading failure; Robustness; CRITIC-VIKOR method

近年来, 学者们围绕城轨网络站点重要度识别与抗毁性分析开展了较多研究。杨景峰等结合站点度中心性和中介中心性建立站点重要度综合评价指标, 并分析级联失效情景下网络抗毁性, 指出考虑站点负载重分配后网络更为脆弱<sup>[1]</sup>。李僖等<sup>[2]</sup>从网络效率和网络连通度两个角度研究城轨线网抗毁性, 认为蓄意破坏尤其是最大介数节点破坏更容易导致网络崩溃。赵瑞琳等<sup>[3]</sup>对多个城市轨道交通网络开展抗毁性对比分析, 揭示了随机攻击和蓄意攻击下网络性能的差异。蔡鉴明等<sup>[4]</sup>认为考虑级联失效后地铁网络脆弱性更加明显。韩紫金等构建客流加权的非线性负载—容量模型, 分析了节点负载重分配对级联失效的影响<sup>[5]</sup>。马飞等<sup>[6]</sup>侧重于考虑非均衡大客流冲击, 分析了级联失效过程中网络结构抗毁性和功能抗毁性的演化规律。而 Chen 等<sup>[7]</sup>从设施层、服务层和客流层出发构建多层网络模型, 用于识别城市轨道交通关键站点。Li 等<sup>[8]</sup>结合预测客流开展动态站点关键性评估, 强调客流时变特征对关键站点识别结果的影响。Meng<sup>[9]</sup>比较了多种复杂地铁网络在不同失效场景下的脆弱性差异。Xu 等<sup>[10]</sup>以上海案例评估了城市轨道交通网络脆弱性, 为关键站点识别与抗毁性分析提供了实例支撑。

## 1 城市轨道交通网络节点评估与级联失效模型

### 1.1 网络节点重要性评价指标与方法

为识别轨道交通网络中的关键站点, 本文采用 Space-L 方法构建上海市轨道交通网络拓扑模型, 从结构属性和功能属性两个方面构建站点重要度评价指标体系。其中, 结构属性指标包括度中心性、接近中心性、介数中心性和特征向量中心性, 用于表征节点在网络中的连接程度、通达能力、中介作用及整体拓扑影响力; 功能属性指标选取节点客流比, 用于反映节点的实际运营作用, 从而实现了对站点重要度的综合评价。

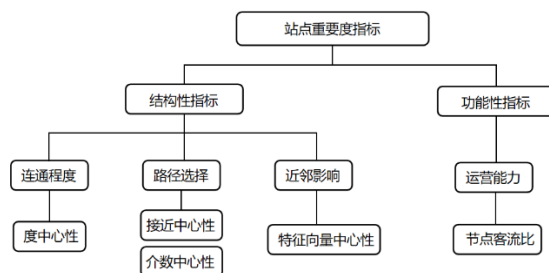


图 1 站点重要度评估指标示意图

Fig. 1 Framework of Station Importance Evaluation Indicators

## (1) 度中心性

节点度中心性基于连通程度，是表征站点结构属性最直观的指标，其值越大，表明节点在网络中的重要性越高。计算公式如下：

$$DC_i = \frac{k_i}{N-1} \quad (1)$$

式中， $k_i$ 为网络中与站点*i*相连的连边数量； $N$ 为网络中的站点总数。

## (2) 接近中心性

接近中心性反映该站点到网络中其他所有站点的平均通达效率。接近中心性值越高，说明该站点在网络中的位置越核心。计算式如下：

$$CC_i = \frac{(N-1)}{\sum_{j=1}^N d_{ij}} \quad (2)$$

式中， $d_{ij}$ 为站点*i*到站点*j*的最短路径长度。

## (3) 介数中心性

介数中心性是从网络全局拓扑结构视角量化轨道交通站点枢纽性的核心指标，数值越大，表示该站点在网络中越重要。计算式如下：

$$BC_i = \frac{B_i}{N(N-1)/2} \quad (3)$$

式中， $B_i$ 为站点*i*的介数值。

## (4) 节点客流比

节点客流比直接反映其在实际运营中的客流聚集与疏散能力，从功能层面去衡量站点的重要度，考虑了城市轨道交通网络的实际运营情况。计算式如下：

$$PF_i = \frac{f_i}{F} 100\% \quad (4)$$

式中， $f_i$ 为单位时间内站点*i*的客流量， $F$ 为单位时间内整个网络的客流量。

## (5) 特征向量中心性

特征向量中心性提供了一种递归视角：节点的全局影响力不仅取决于自身连接，更取决于其邻居节点的影响力。与重要节点相连，能显著提升自身在网络中的重要性，并引入特征向量中心性指标对网络的节点重要性进行排序。计算式如下：

$$x_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (5)$$

式中， $x_i$ 表示节点*i*的特征向量中心性； $a_{ij}$ 表示网络邻接矩阵  $A$  中的元素， $\lambda$  表示邻接矩阵  $A$  的特征值，通常取最大特征值； $n$  表示网络中的节点总数。

评价是认识事物本质的一种常用的重要手段。对于复杂对象的评价，通常需要综合考虑多方面影响因素，单一指标或视角往往因缺乏全面性而难以获得理想的评价结果。基于现有方法的优缺点及适用性分析，本文采用 CRITIC-VIKOR 综合评估模型，该方法通过 CRITIC 法客观确定指标权重，

再利用 VIKOR 法计算各节点的综合评价值以进行排序。核心步骤与公式概括如下：

$$Q_i = v \cdot \frac{\sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} - S^*}{S^- - S^*} + (1-v) \cdot \frac{\max_j \left[ w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] - R^*}{R^- - R^*} \quad (6)$$

$$\text{式中, } w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}, C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk})$$

式中,  $f_{ij}$  为第  $i$  个评价对象在第  $j$  个指标上的取值,  $w_j$  为由 CRITIC 方法确定的指标权重, 其中  $\sigma_j$  表示指标标准差,  $r_{jk}$  表示指标间相关系数,  $S$  为加权群体效用值,  $R$  为个体遗憾值,  $v$  为折中系数 (通常取 0.5), 用于权衡群体效用与个体遗憾, 从而得到综合评价值  $Q_i$  并实现排序。

## 1.2 级联失效模型

在级联失效研究中, 既有文献普遍采用“结构负载”来定义初始负载, 虽然“结构负载”在一定程度上可以反映负载的分布情况, 但是“结构负载”和现实情况之间仍然存在一定的差异。所以, 本节将城市轨道交通车站的初始负载定义为该车站的当日客流量, 即“客流负载”, 其计算公式为:

$$L_i = \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (7)$$

式中,  $F_i$  是节点  $i$  的当日总客流量。  $F_{\min}$  是所有车站中的最小日客流量。  $F_{\max}$  是所有车站中的最大日客流量。

节点最大容量对应于城市轨道交通网络站点的最大客流承载能力。在现实网络中, 负载与容量之间常呈现出非线性关系, 初始负载较小的节点可能有较大的空闲容量。因此, 本文采用一种双变量的非线性容量负载模型来计算轨道网络节点的最大容量, 如式所示:

$$C_i = Load_i(0) + \alpha Load_i(0)^\beta \quad (8)$$

式中,  $C_i$  是节点  $i$  的最大容量;  $\alpha$  是负载容忍系数;  $\beta$  是容量可调参数。可通过调整  $\alpha$  与  $\beta$  来调节网络节点容量的大小。

现有负载分配策略主要分为平均分配与择优分配两类, 其中择优分配更符合实际运营情况。因此, 本节采用基于剩余容量的择优分配策略对失效车站的负载进行重分配。该策略根据相邻车站的剩余承载能力分配失效车站的客流, 即剩余容量越大的车站, 分担的转移客流量越多。计算公式如下:

$$\Delta L_{ij}^c = \beta \times L_i \times \frac{C_j - L_j}{\sum_{n \in \Gamma_i} (C_n - L_n)} \quad (9)$$

式中:  $\Delta L$  为根据剩余容量负载分配策略从车站  $i$  转移到车站  $j$  的客流量。

当前, 无权网络抗毁性研究多采用网络效率与最大连通子图相对规模的综合评价框架, 从全局信息传输效能和结构完整性两个维度评估网络性能, 但该方法主要基于拓扑结构, 未充分考虑客流

分布对系统功能的影响。为此,本文引入客流加权思想,构建“网络全局流量加权效率”和“最大流量连通子图比例”两个功能导向型指标:前者在传统效率基础上以客流量比例为权重,刻画客流不均衡条件下的实际传输性能;后者以客流规模替代节点数量,从客运连续性角度衡量网络维持核心服务的能力,从而完善轨道交通网络抗毁性评价体系。在攻击策略上,本文将城市地铁网络抗毁性分析划分为随机攻击和蓄意攻击两类:随机攻击通过 Matlab 生成随机序列对已编号站点进行移除;蓄意攻击则按照递增的节点失效比例,依次实施度攻击、介数攻击和综合重要度排序攻击。

### (1) 网络全局流量加权效率

为更真实地反映客流负荷对网络性能的影响,在传统网络效率指标的基础上引入客流权重,构建网络全局流量加权效率指标。其表达式如下:

$$E_f = \frac{Q}{Q_0} \cdot \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (10)$$

式中,  $Q$  表示当前网络状态下的实际客流量,  $Q_0$  为取正常运营状态下的客流量。

### (2) 最大流量连通子图比例

最大流量连通子图比例以客流规模替代节点数量作为评估依据,其计算式为:

$$S_f = \frac{Q_c}{Q_t} \quad (11)$$

式中,  $Q_c$  表示网络中最大客流连通子图的客流量,  $Q_t$  为全网总客流量。该指标从客运服务连续性的角度,评估网络在受损情况下维持核心客运功能的能力。

## 2 结果与分析

### 2.1 节点重要度识别

本研究聚焦于城市轨道交通网络的方法论分析,由于客流数据统计原因,拓扑数据采集时间统一锚定于 2023 年 3 月,以确保拓扑与客流数据的时空一致性。截至 2023 年 3 月,上海市轨道交通网络共投入运营线路 20 条(涵盖 1-18 号线、浦江线及磁浮线),全网运营车站总计 407 座,其中换乘站达到 85 座,客流数据来源于上海市轨道交通网络 2023 年 3 月 9 日工作日的全网分站客流统计,当日客流量等于进站人数、出站人数及换乘人数之和。

根据式(6)对上述结果进行综合计算,得到各评价指标的权重值,计算结果见表 1。

表 1 站点重要度评估指标权重计算表

Table 1 Weight Calculation of Station Importance Evaluation Indicators

指标	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重	排序
度中心性	0.1479	1.5693	0.2321	0.1460	4
介数中心性	0.2528	1.4927	0.3774	0.2375	2
接近中心性	0.1648	1.8224	0.3003	0.189	3
节点客流比	0.2575	1.7804	0.4585	0.2884	1
特征向量中心性	0.1500	1.4745	0.2212	0.1391	5

按式(6)计算每个节点的群体效益值、个体遗憾值和折中利益比率,得到上海市轨道交通网络中 407 个站点的重要度排序。表 2 节选了重要度排名前 10 的站点。

表2 上海市轨道交通站点重要度排序结果(前10)

节点编号	站点名称	S	R	Q	排序
48	静安寺	0.2855	0.2359	0.03208	1
47	南京西路	0.2572	0.2572	0.04644	2
13	人民广场	0.3369	0.2279	0.05437	3
76	曹杨路	0.3374	0.2359	0.06745	4
15	汉中路	0.3505	0.2511	0.10045	5
11	陕西南路	0.304	0.304	0.1526	6
49	江苏路	0.4903	0.252	0.1972	7
8	徐家汇	0.4939	0.2602	0.21255	8
16	上海火车站	0.4007	0.3006	0.21311	9
46	南京东路	0.4291	0.3044	0.23858	10

表2显示,上海市轨道交通站点重要度前10名以换乘枢纽站为主,体现出网络关键节点高度集中的特征。其中,静安寺站以较优的综合表现位列第1,说明其在结构位置与功能承载上均具有突出优势。南京西路、人民广场、曹杨路、汉中路紧随其后,也均为网络中联系能力强、客流集聚明显的重要站点。表明中心城区大型换乘站对网络稳定运行具有显著支撑作用。

表3 上海市轨道交通站点重要度排序对比(前5)

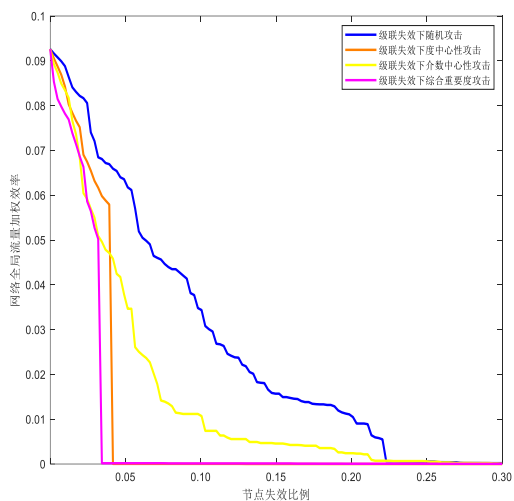
站点名称	重要性排序单项排序					重要度综合排序
	度中心性	接近中心性	介数中心性	节点客流比	特征向量中心性	
静安寺	6	2	5	14	4	1
南京西路	3	1	10	17	1	2
人民广场	4	5	17	5	2	3
曹杨路	9	31	3	39	18	4
汉中路	7	10	20	2	6	5

由表3可知,尽管该站点在各单项指标中的排序均未位列第一,但其综合排序仍居最高。静安寺站的案例说明,某些节点虽然在特定指标上表现不突出,但其在各方面的均衡优势使其整体重要度显著提升,这体现了综合评估方法相较于单一指标分析的优越性和合理性。

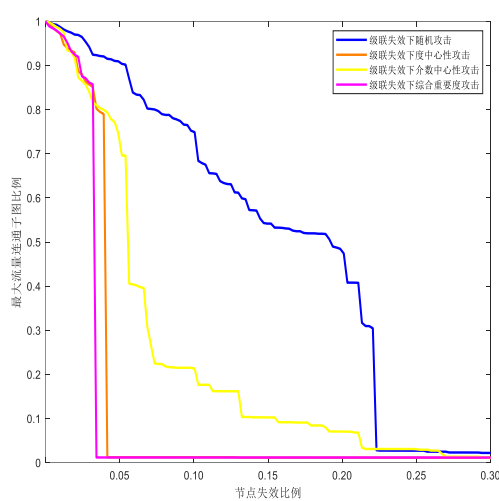
## 2.2 级联失效下攻击多个站点的抗毁性能分析

为研究城市轨道交通网络级联失效机理及模型参数对网络抗毁性的影响,本文以上海市轨道交通网络为对象,基于非线性容量负载模型分析不同参数条件下网络性能指标的变化规律。为控制变量并突出参数敏感性,本文将节点攻击规模设定为网络总节点的30%,在此基础上考察级联失效过程中网络抗毁性能的演化特征。

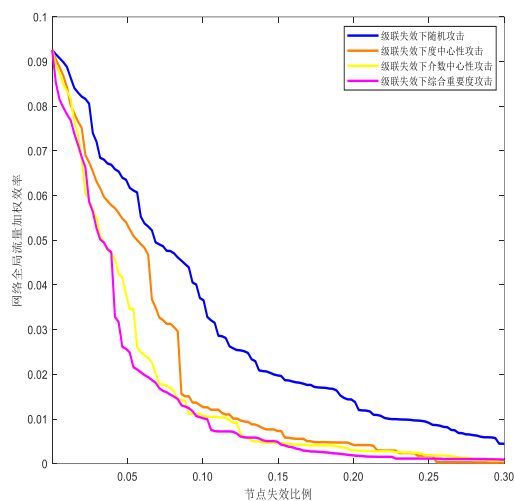
设定容量可调参数 $\beta$ 不变,分析网络性能指标与负载容忍系数 $\alpha$ 的关系。当 $\beta=1$ 时非线性容量负载模型将退化为容量负载模型,因此本文取 $\beta=1.1$ 进行分析,如图2所示。



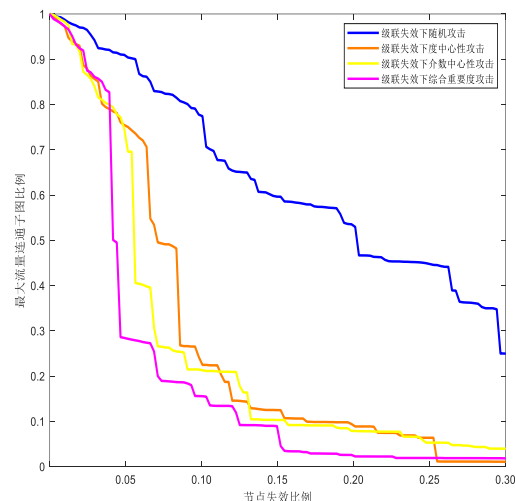
(a)  $\alpha=0.4$  时网络全局流量加权效率变化图



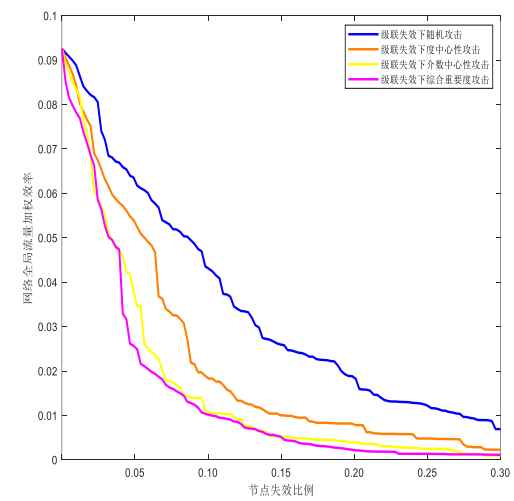
(b)  $\alpha=0.4$  时的最大流量连通子图变化图



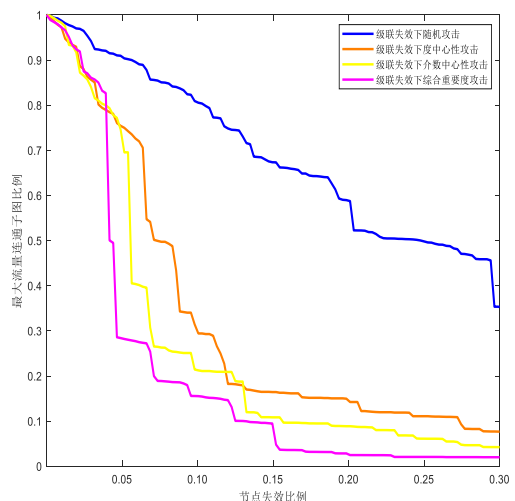
(c)  $\alpha=0.8$  时网络全局流量加权效率变化图



(d)  $\alpha=0.8$  时最大流量连通子图变化图



(e)  $\alpha=1.2$  时网络全局流量加权效率变化图



(f)  $\alpha=1.2$  时最大流量连通子图变化图

图 2 固定  $\beta=1.1$  变化  $\alpha$  情况下攻击多个站点网络性能变化

Fig. 2 Network performance variation under attacks on multiple stations with fixed  $\beta=1.1$  and varying  $\alpha$

从图2可知,在随机攻击下上海轨道交通网络抗毁性较强,而在蓄意攻击下,网络性能急剧恶化,两项指标均呈现断崖式下跌。

具体来看,负载容忍系数 $\alpha$ 的增加显著提升了网络抗毁性。 $\alpha=0.4$ 时网络极为脆弱,仅失效4%的关键节点就导致全网崩溃,流量效率与连通比例骤降至0.19%和1.8%; $\alpha=0.8$ 时抗毁性明显改善,相同攻击下两项指标仍可维持在51.8%和82.7%; $\alpha=1.2$ 时网络表现出最强抗毁性,说明高容量配置能有效抑制级联传播。

整体上,随着 $\alpha$ 增大,各类攻击下的性能曲线均趋于平缓,表明网络对随机故障和蓄意攻击的抵抗能力均得到增强。此外,不同攻击策略的效果差异随 $\alpha$ 增大而先扩大后缩小:负载容忍系数低时关键节点识别至关重要;负载容忍系数高时网络整体抗毁性增强,节点重要性差异的影响减弱。

### 3 讨论

近年来,学者们围绕城市轨道交通网络关键节点识别与抗毁性分析开展了较多研究。Freeman<sup>[11]</sup>从介数中心性的角度揭示了节点在网络路径组织中的桥梁作用,指出节点重要性并不完全取决于其直接连接数量。Kitsak等<sup>[12]</sup>进一步提出,若仅依据局部连接关系识别关键节点,容易忽视节点在网络传播和扩散过程中的真实影响。Xing等<sup>[13]</sup>和李天雨等<sup>[14]</sup>的研究表明,节点重要性不仅取决于其直接连接数量,还与其对网络脆弱性演化及局部扩散过程的影响密切相关。在抗毁性研究方面,Rodriguez-Nunez等<sup>[15]</sup>认为公共交通网络脆弱性不仅表现为结构中断,还表现为运输服务水平下降;Qian等<sup>[16]</sup>则指出,节点容量配置和负载转移机制会显著影响级联失效的传播范围;侯诗雨等<sup>[17]</sup>从动态传播视角出发,强调关键节点识别应兼顾网络结构特征与传播过程演化。尽管如此,现有研究仍存在三方面不足:一是关键节点识别仍较多依赖单一拓扑指标,对客流强度、换乘功能和站点综合作用考虑不够;二是级联失效分析往往偏重静态结构扰动,对节点失效后的客流再分配和连续扩散刻画不足;三是抗毁性评价多采用网络效率、最大连通子图等结构性指标,对客运服务连续性和功能保持能力的反映还不够充分。

针对上述不足,本文以上海市轨道交通网络为对象,将度中心性、接近中心性、介数中心性、特征向量中心性和节点客流比纳入统一评价框架,并结合CRITIC-VIKOR方法开展关键站点识别。Freeman<sup>[11]</sup>与Kitsak等<sup>[12]</sup>强节点中介作用的思路相比,本文不再局限于最短路径控制能力,而是进一步考虑站点客流承载和邻域影响力;与Xing等<sup>[13]</sup>、李天雨等<sup>[14]</sup>基于局部结构特征的识别方法相比,本文更强调结构属性与功能属性的耦合分析,以提高关键节点识别结果的全面性与准确性。这种处理能够更好地解释中心城区大型换乘枢纽在排序中的靠前位置,因为这类站点不仅承担网络连接任务,还具有更强的客流集散和换乘组织功能。

在级联抗毁性分析中,本文以节点客流作为初始负载,并引入非线性容量—负载模型和基于剩余容量的择优分配策略。相较于Rodriguez-Nunez等<sup>[15]</sup>偏重服务损失视角的研究,本文进一步将客流转移过程纳入级联传播分析;相较于Qian等<sup>[16]</sup>关于容量影响级联扩散的讨论,本文结合上海轨道交通网络说明,关键站点失效后的网络性能衰减并非仅由结构断裂引起,还与负载再分配能力密切相关。同时,结合侯诗雨等<sup>[17]</sup>关于动态传播过程的研究思路,可以看出城市轨道交通网络脆弱性并不是静态不变的,而是在“节点重要性—客流负载—容量约束”共同作用下持续演化的。

此外,本文仍有进一步完善空间。例如,客流数据采用单一工作日样本,尚未覆盖高峰时段、节假日及突发事件情景;模型中的容量设定与负载转移规则仍属于理论抽象,与真实运营中的限流、

跳停和应急接驳措施之间尚有差异。后续可结合多时段客流数据和动态调度机制,进一步提升关键节点识别与级联抗毁性研究的现实适用性。

#### 4 结论

本文构建了城市轨道交通网络关键站点识别与级联抗毁性分析模型,为网络关键薄弱环节识别与抗毁性提升提供了分析依据。主要结论如下:

(1) 综合重要度模型在关键薄弱环节识别中具有较好适用性。融合度中心性、接近中心性、介数中心性、特征向量中心性和节点客流比的综合评价方法,能够较好兼顾站点的结构属性与功能属性。其中,节点客流比权重最高,为0.2884,说明客流承载能力是影响站点重要性识别的关键因素。

(2) 上海市轨道交通网络关键站点集中于中心城区大型换乘枢纽。站点重要度排序结果显示,静安寺站综合重要度最高,南京西路、人民广场、曹杨路等站点排序靠前。这些站点在网络连接、换乘组织和客流集散中发挥核心作用,是网络中的重点防护对象。

(3) 级联失效条件下网络抗毁性呈现显著参数敏感性,且对关键节点攻击更为脆弱。随机攻击下网络性能下降相对平缓,而蓄意攻击尤其是基于综合重要度排序的攻击破坏性最强。当 $\alpha=0.4$ 时,仅失效4%的关键节点,网络全局流量加权效率和最大流量连通子图比例即降至0.19%和1.8%;当 $\alpha=0.8$ 时,两项指标仍可维持在51.8%和82.7%,说明提高节点容量冗余能够有效抑制级联传播并增强网络抗毁性。

需进一步研究:多时段客流波动条件下关键站点重要性的动态变化,以及考虑限流、跳停和应急接驳措施后的级联失效演化规律。

#### 参考文献

- [1] 杨景峰,朱大鹏,赵瑞琳.城市轨道交通网络特性与级联失效鲁棒性分析[J].计算机工程与应用,2022,58(07):250-258.
- [2] 李僖,马亮,郭进,等.城市轨道交通线网拓扑特性及抗毁性分析[J].铁道标准设计,2025,69(07):39-45.
- [3] 赵瑞琳,牟海波,肖丁,等.基于复杂网络理论的城轨线网抗毁性对比分析[J].交通信息与安全,2021,39(03):41-49.
- [4] 蔡鉴明,邓薇.长沙地铁网络复杂特性与级联失效鲁棒性分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(06):1587-1596.
- [5] 韩紫金,钱名军,王玺宪,等.基于超图理论的城市轨道交通超网络级联失效仿真[J].系统仿真学报,2024,36(12):2960-2970.
- [6] 马飞,蒋金凤,敖誉芸,等.非均衡大客流冲击下城市轨道交通网络抗毁性建模及演化特征[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(10):1717-1733.
- [7] Chen T, Ma J, Zhu Z, et al. Evaluation method for node importance of urban rail network considering traffic characteristics[J]. Sustainability, 2023, 15(4): 3582.
- [8] Li P, Shao B, Zhao G, et al. Negative sampling strategies impact the prediction of scale-free biomolecular network interactions with machine learning[J]. BMC biology, 2025, 23(1): 123.
- [9] Meng Y. Vulnerability comparisons of various complex urban metro networks under multiple failure scenarios[J]. Sustainability, 2024, 16(21): 9603.
- [10] Cheng J, Tan L, Lu X, et al. Photosynthetic Toxicological effects of organic extracts from *Zanthoxylum bungeanum* leaves on controlling the *Microcystis aeruginosa* Blooms[J]. Current Microbiology, 2025, 82(1): 1-12.
- [11] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. Social networks, 1978, 1(3): 215-239.
- [12] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nature physics, 2010, 6(11): 888-893.
- [13] Xing Y, Lu J, Chen S, et al. Vulnerability analysis of urban rail transit based on complex network theory: a case study of

- Shanghai Metro[J]. *Public Transport*, 2017, 9(3): 501-525.
- [14] 李天雨, 滕桂法, 姚竟发. 基于改进K-shell的复杂网络关键节点识别方法[J]. *现代电子技术*, 2025, 48(07): 95-103.
- [15] Rodriguez-nunez E, Garcia-palomares J C. Measuring the vulnerability of public transport networks[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 35(2): 50-63.
- [16] Xu L, Xiang P, Qian Y, et al. Vulnerability Assessment of Urban Rail Transit Network—A Case Study of Chongqing[J]. *Buildings*, 2025, 15(2): 170.
- [17] 侯诗雨, 刘影, 唐明. 融合节点动态传播特征与局域结构的复杂网络传播关键节点识别[J]. *物理学报*, 2025, 74(10): 359-372.

**基金项目:** 内蒙古寒旱区公路施工阶段碳排放测算研究——以包头市某一级公路为例(2023QN05009)。

**第1作者简介:** 于景飞(1974-), 男, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 交通运输。E-mail: yujf@imust.edu.cn。

**\* 通讯作者简介:** 谢存宇(2000-), 男, 硕士在读, 研究方向: 韧性交通。E-mail: xiecunyu@nmgkidx30.wecom.work。