

融合复杂网络与攻击模拟的城市轨道交通网络 抗毁性分析

王中政¹, 项玉卿^{2,3*}

1. 河北地质大学城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北地质大学管理学院, 河北 石家庄 050031;
3. 石家庄铁道大学管理学院, 河北 石家庄 050043

摘要:为系统评估城市轨道交通网络应对不确定性干扰的抵御能力,以石家庄城市轨道交通(规划)网络为研究对象,基于复杂网络理论,采用Space-L方法构建无向无权网络拓扑模型,通过计算度分布、平均路径长度、聚类系数等拓扑参数识别网络特征,设计涵盖节点与连边失效的6种攻击策略,结合网络效率和最大连通子图比例评估城市轨道交通网络在随机攻击与蓄意攻击场景下的网络抗毁性,采用模拟单节点和单连边失效的方式识别关键节点和关键连边。结果表明:通过对比石家庄轨道交通(规划)网络与随机网络的拓扑参数,计算得到小世界网络指数 $s=1.1103 > 1.0000$,且度分布近似服从泊松分布,表明该网络具有小世界网络特性;该网络对基于节点度与节点介数的蓄意攻击较敏感,对基于连边介数的攻击表现出较强韧性;不同节点或连边失效对网络效率影响差异显著,节点和连边的静态拓扑指标(度、介数)与其失效所引起的实际网络性能下降不存在正相关关系。应通过强化关键站点与区间防护、优化网络拓扑结构、建立多模式交通应急联运体系增强石家庄城市轨道交通(规划)网络的抗毁性。

关键词:城市轨道交通;复杂网络;抗毁性;关键节点;关键连边

中图分类号:U231

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2026)01-0014-11

引用格式:王中政, 项玉卿. 融合复杂网络与攻击模拟的城市轨道交通网络抗毁性分析[J]. 山东交通学院学报, 2026, 34(1): 14-24.

WANG Zhongzheng, XU Yuqing. Resilience analysis of urban rail transit networks integrating complex networks and attack simulation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1): 14-24.

0 引言

随着全球城市化进程不断深入,城市轨道交通作为现代都市交通体系的核心组成部分,以其运载能力强、环境污染小、线网密度高等优势,成为缓解城市交通压力的关键基础设施。轨道交通网络的快速扩展也使其拓扑结构与运行机制日趋复杂,带来全新的安全管理挑战。突发自然灾害、设备故障及人为破坏等事件均可能导致网络中关键节点失效,进而引发级联故障,严重时甚至造成网络瘫痪。需深入开展轨道交通网络抗毁性研究,为运营管理、应急布局与系统韧性提高提供科学依据。

城市轨道交通网络抗毁性研究已成为学者们关注的热点问题^[1-3]。李僖等^[4]构建基于随机失效与针对性攻击双重视角下的网络抗毁性分析模型,通过节点度分布、介数中心性及聚类效应等多维度指标验证城市轨道交通网络同时具备小世界网络的高连通性与无标度网络的拓扑抗毁性。Zhang等^[5]以北京、上海、广州3个城市的轨道交通为研究对象,构建网络拓扑模型,采用最大节点度攻击和最高节点介

收稿日期:2025-04-06

基金项目:国家社会科学基金项目(20FJYB030)

第一作者简介:王中政(1997—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为大数据分析,E-mail:847645642@qq.com。

* 通信作者简介:项玉卿(1980—),女,石家庄人,副教授,博士研究生,主要研究方向为产业创新管理、物流与交通管理、商务智能分析与决策,E-mail:xyuqing@126.com。

数攻击两种蓄意攻击策略,通过仿真分析发现3个城市轨道交通网络在遭蓄意攻击时均表现出显著脆弱性,其中上海轨道交通网络因部分节点承载负荷较高,脆弱性最大。Xu等^[6]以上海轨道交通为例,基于复杂网络理论与Space-L建模方法,构建运营网络与规划网络的拓扑模型,探讨网络拓扑演化与抗毁性间的关联机制。

部分学者深入研究城市轨道交通关键节点的识别问题^[7-9]。路庆昌等^[10]以上海轨道交通为例,通过对比中心性拓扑指标与客流强度、网络效率损失等指标,识别关键节点。涂敏等^[11]通过Space-L方法构建武汉轨道交通网络拓扑模型,融合局部属性(度中心性)、全局属性(介数、紧密中心性)和网络交互特征,采用基于余弦相似度的改进逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)评估节点重要度。Meng等^[12]以深圳轨道交通网络为例,提出结合变异系数法与TOPSIS的加权TOPSIS法,结合复杂网络中心性指标,构建多维节点重要性评估体系,认为相比单一指标,加权TOPSIS法能更全面识别关键节点。王亭等^[13]以西安轨道交通网络为例,评估节点的局部传输能力与全局效率,采用多指标加权融合方法,构建融合拓扑结构与客流特征的关键节点评价体系,该方法可有效识别同时具备结构枢纽作用与客流集散功能的关键节点。现有研究主要对节点施加随机攻击或蓄意攻击^[14-16],根据网络性能变化评估其抗毁能力,忽略了网络结构特征与节点间连边关系的重要性;在轨道交通关键节点识别问题上,常采用多种方法分析节点失效后的剩余网络^[17-19],较少考虑重要节点对初始网络的影响,难以全面反映节点的重要程度。

本文基于Space-L方法,构建石家庄城市轨道交通(规划)的无向无权网络模型,结合复杂网络拓扑特征,探究该网络是否具有小世界网络特征,根据节点与连边的度中心性和介数中心性指标,分别模拟随机攻击与蓄意攻击场景,量化分析不同压力条件下网络结构的稳定性;采用节点与连边逐一移除的方式,评估失效目标对网络效率的影响,识别关键节点与关键连边,以期为石家庄城市轨道交通网络的规划与韧性提高提供参考。

1 网络拓扑特性指标

网络拓扑特性指标是量化网络结构特征的统计参数,常作为区分特殊网络与一般网络的重要依据,主要包括度、平均度、介数中心性、网络密度、聚类系数、平均路径长度、网络效率及最大连通子图比例等。通过对比故障前后城市轨道交通网络最大连通子图相对规模的变化以及网络效率的下降趋势,系统评估网络的抗毁性,识别关键节点与关键连边。

节点度是与该节点直接相连的边数,节点*i*的度

$$k_i = \sum_{j \in V} a_{ij},$$

式中: a_{ij} 为节点*i*与节点*j*的邻接矩阵元素,两节点相连时, $a_{ij}=1$,两节点不相连时, $a_{ij}=0$;V为节点集合。

平均节点度

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i,$$

式中*N*为网络中的节点总数。

所有最短路径中经过该节点的路径所占比例为节点介数。节点*v*的介数

$$B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}},$$

式中: σ_{st} 为节点*s*到节点*t*的最短路径数量, $\sigma_{st}(v)$ 为节点*s*到节点*t*的全部最短路径中经过节点*v*的路径数量。

网络密度 ρ 是衡量网络整体连接完备程度的基础拓扑指标,计算公式为:

$$\rho = \frac{2M}{N(N-1)},$$

式中: M 为网络中实际连边的总数, $N(N-1)/2$ 为具有 N 个节点的无向网络中理论上可能存在的最大连边总数。

聚类系数 C 衡量网络局部聚集的程度, 计算公式为:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)},$$

式中 E_i 为节点 i 的邻居间实际存在的连边总数。

平均路径长度 L 衡量网络的全局连通效率, 计算公式为:

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

式中: d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的最短路径长度, 若节点 i 与节点 j 不连通, 则 $d_{ij} = \infty$ 。

网络效率 E 为网络中所有节点对间最短路径长度倒数的平均值, 反映网络连通性的整体质量, 计算公式为:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} \frac{1}{d_{ij}}.$$

最大连通子图比例 J 用于量化在遭受攻击或出现故障后, 网络主体结构保持连通的程度, 计算公式为:

$$J = N_r/N,$$

式中 N_r 为攻击或故障后网络中最大连通子图所包含的节点数。

2 实例分析

2.1 网络构建

可采用 Space-L 和 Space-P 两种方法进行城市轨道交通网络建模: Space-L 基于节点的地理邻近性构建网络, 若两节点在实际运行中为相邻停靠站, 则二者间建立一条连边^[20]; Space-P 基于功能路径构建网络, 若任意两节点间至少有一次列车经过且停靠则认为有连边, 该方法直观反映乘客出行中的换乘关系^[21-22]。在城市轨道交通网络抗毁性分析中, 物理网络通常更适合作为研究对象, 其静态拓扑特征直接决定网络在遭受攻击时维持连通性的能力, 复杂网络中的拓扑特征指标可有效量化其鲁棒性。相较于动态运营网络, 物理网络数据更稳定, 便于通过攻击模拟识别网络中的关键区域。轨道交通网络普遍具有双向通行特性, 即乘客可从 A 站经某线路到达 B 站, 亦可沿同一线路返回 A 站。因此, 在构建网络时, 可不区分线路的上下行方向, 仅依据节点间的实际物理连接进行建模。本文基于 Space-L 法构建未来规划期内石家庄城市轨道交通的无向无权物理网络拓扑结构, 并在此基础上分析其抗毁性。

为提高公共交通服务水平, 增强城市交通承载力, 石家庄正持续推进骨干路网建设, 城市轨道交通建设已进入高强度实施阶段。结合既有线路及《石家庄城市轨道交通线网规划(2021—2035)公示》构建石家庄城市轨道交通(规划)网络拓扑结构示意图。构建过程中, 未纳入市郊铁路(S线)的规划布局, 在轨道交通线路空间交叠区域, 将实际位置重合的站点统一处理为多线路换乘枢纽节点。该网络可表示为 $G=(V, E)$, 其中: V 为节点集合, 每个节点对应一个站点; E 为节点间连边集合。构建网络拓扑结构图步骤为: 站点编号→确定站点间的连接关系→构造邻接矩阵 A →输入 Python 中的工具包 NetworkX→生成网络拓扑结构图。石家庄城市轨道交通(规划)网络拓扑结构示意图如图 1 所示。

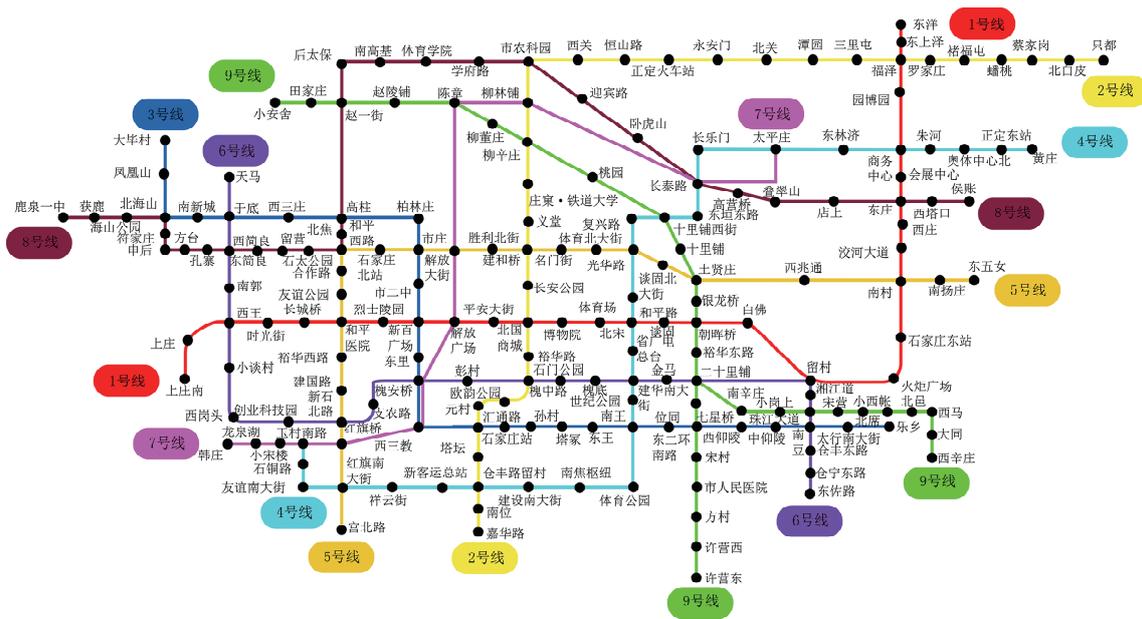


图 1 石家庄城市轨道交通(规划)网络拓扑结构示意图

2.2 特征分析

2.2.1 网络基本特征分析

基于复杂网络理论,采用 NetworkX 对石家庄城市轨道交通(规划)网络拓扑结构进行量化分析可知:该网络由 194 个节点和 230 条边组成,平均节点度为 2.36,表明网络中多数节点仅与相邻节点相连,服务于单条线路,中转站比例较低;网络密度为 0.012 2,聚类系数为 0.007 5,说明网络整体较稀疏,局部三角形闭合结构极少,节点间缺乏冗余连接;网络效率为 0.136 8,平均路径长度为 10.199 0,说明乘客在不同节点间通行需经较多中间站点,跨区域出行效率偏低,该现象与网络中换乘枢纽数不足、直达路径有限的拓扑结构密切相关,在实际运营中可能导致换乘次数增加、行程时间延长。

2.2.2 网络特性分析

小世界网络兼具规则网络的高聚类特性与随机网络的短平均路径特征^[23]。判断一个网络是否具有小世界属性需满足以下条件:

$$s = (C/C_{\text{random}}) / (L/L_{\text{random}}) > 1,$$

式中: s 为小世界网络指数, C_{random} 和 L_{random} 分别为与该网络相同规模的随机网络的聚类系数和平均路径长度。

为验证基于 Space-L 方法构建的石家庄城市轨道交通(规划)网络具有小世界网络特性,通过 NetworkX 生成 100 个与石家庄城市轨道交通(规划)网络相同规模的节点数、连边数和平均节点度的随机网络样本集,计算得到平均路径长度的均值为 7.701 0,聚类系数的均值为 0.005 1,则 $s = 1.110 3 > 1.000 0$,符合小世界网络特征。

近似采用泊松分布描述小世界网络度分布,计算石家庄城市轨道交通(规划)网络的节点度分布 $P(k)$,检验网络结构,计算结果为: $P(1) = 0.087 2, P(2) = 0.692 3, P(3) = 0.015 4, P(4) = 0.189 7, P(5) = 0.010 3, P(6) = 0.005 1$ 。度为 2 的节点数占节点总数的 69.23%,度大于 2 的节点数仅占 22.05%,表明网络中大部分节点仅通过一条线路。

节点度分布的拟合图如图 2 所示。由图 2 可知节点

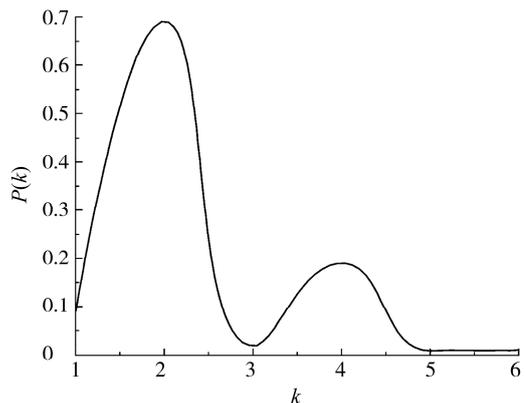


图 2 节点度分布的拟合图

度分布形态符合泊松分布。因此,基于 Space-L 方法构建的石家庄城市轨道交通(规划)网络在拓扑结构上具有小世界网络的基本特征。

3 不同攻击策略下的网络抗毁性分析

网络抗毁性是指复杂网络的部分拓扑单元在遭受恶意攻击、硬件故障、自然灾害等破坏后,维持其功能连续性与结构稳定性,并快速恢复整体性能的能力^[24]。本文通过模拟不同攻击策略下的石家庄城市轨道交通(规划)网络的失效过程,分析其抗毁性。

3.1 攻击策略

为系统分析城市轨道交通网络在不同攻击场景下的失效机制,设计以下 6 类攻击策略:节点度随机攻击、基于最大节点度的蓄意攻击、节点介数随机攻击、基于最大节点介数的蓄意攻击、连边介数随机攻击和基于最大连边介数的蓄意攻击。每次攻击一个目标,随机攻击时,随机选取攻击目标,蓄意攻击时,按照对应指标(度或介数)从大到小的顺序依次攻击。城市轨道交通网络攻击仿真流程如图 3 所示。

3.2 抗毁性分析

3.2.1 基于节点度攻击的网络抗毁性分析

对比网络效率与最大连通子图比例,评估城市轨道交通网络在不同攻击策略下的性能变化。基于节点度的随机攻击与蓄意攻击下城市轨道交通网络性能变化如图 4 所示。由图 4 可知:1)基于节点度的随机攻击下网络性能下降较缓慢,第 20 次随机攻击后,网络效率为 0.106 2,最大连通子图比例降至 0.794 9;基于最大节点度的蓄意攻击下,网络性能急剧下降,第 20 次蓄意攻击后,网络效率降至 0.030 8,最大连通子图比例降至 0.189 7,蓄意攻击对网络连通性的破坏力比随机攻击强。当网络受到第 93 次蓄意攻击后,网络效率仅为 0.000 2,最大连通子图比例为 0.010 3,网络已基本瘫痪。2)在蓄意攻击过程中,第 3、10、18 次攻击对网络性能的影响最突出,网络效率分别减小 0.014 3、0.020 6、0.006 9,最大连通子图比例分别减小 0.087 1、0.317 9、0.082 0。这 3 次攻击分别对应二十里铺站、朝晖桥站和槐中路站的失效,说明这些节点在网络连通性中具有关键作用。

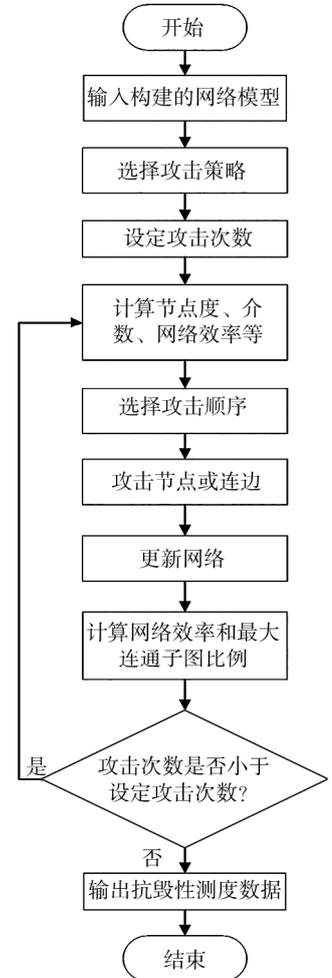


图 3 城市轨道交通网络攻击仿真流程

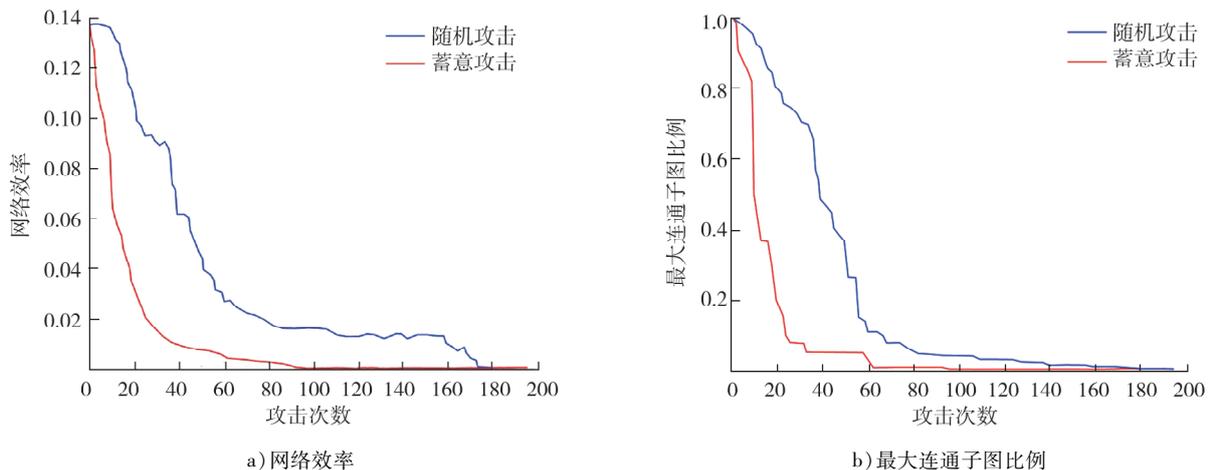


图 4 基于节点度的随机攻击与蓄意攻击下城市轨道交通网络性能变化

3.2.2 基于节点介数攻击的网络抗毁性分析

基于节点介数的随机攻击与蓄意攻击下,城市轨道交通网络性能变化如图5所示。

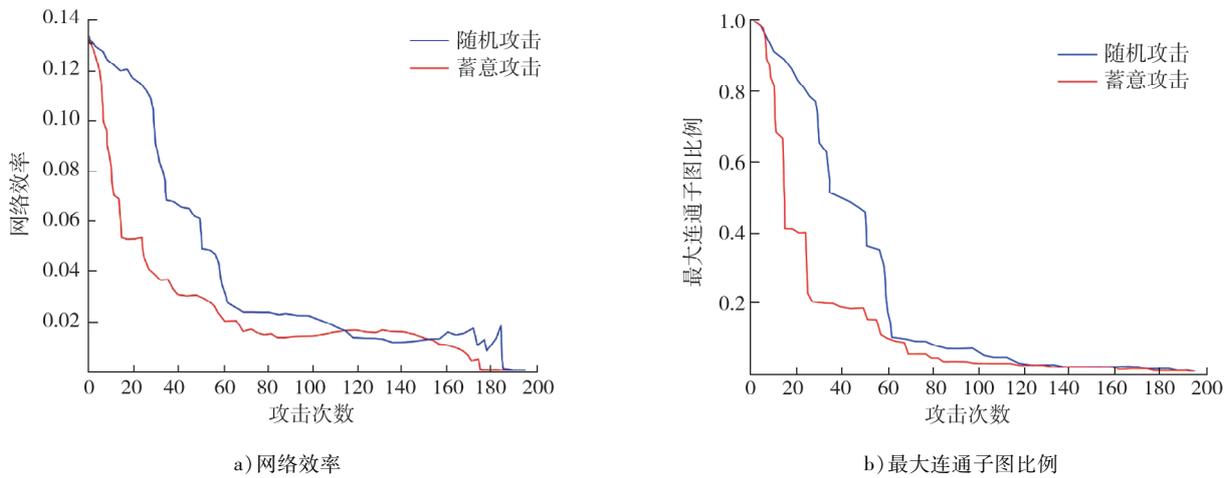


图5 基于节点介数的随机攻击与蓄意攻击下城市轨道交通网络性能变化

由图5可知:1)相较于随机攻击,基于最大节点介数的蓄意攻击对网络整体性能的影响更显著,在攻击初期,蓄意攻击下的网络效率急剧下降,下降速率明显高于随机攻击,主要原因是蓄意攻击优先移除高介数节点(如换乘站点),这些节点在网络中承担着连接不同模块的桥梁作用,高介数节点失效会导致网络分裂为多个子模块,最短路径长度大幅增加,网络效率显著降低;第70次蓄意攻击后,网络效率下降速率放缓,随机攻击下的效率曲线在仿真后期(约第116次攻击后)逐渐接近并最终低于蓄意攻击曲线,主要原因是蓄意攻击已移除大部分关键节点,剩余多为模块内部低介数节点,对网络效率的影响较小,而随机攻击在后期可能偶然移除多个模块内部的局部枢纽,导致子模块进一步碎片化,加剧网络效率下降^[25],如第120次攻击后,随机攻击下的网络碎片化状态比蓄意攻击更严重(见图6);至第185次攻击后,两种攻击下的网络效率均接近0,整体上蓄意攻击曲线所反映的网络性能恶化过程更剧烈。2)随机攻击下最大连通子图比例缓慢下降,表明网络对随机攻击具有一定的容忍性。蓄意攻击下,最大连通子图比例在前28次攻击下急剧下降,共减小0.8051,其中,第11、15次攻击分别减小0.1487、0.2513,优先攻击高介数节点,最大连通子图比例显著下降;此后进入平缓下降阶段,剩余节点中心性较低,对最大连通子图比例的破坏作用逐渐减弱。

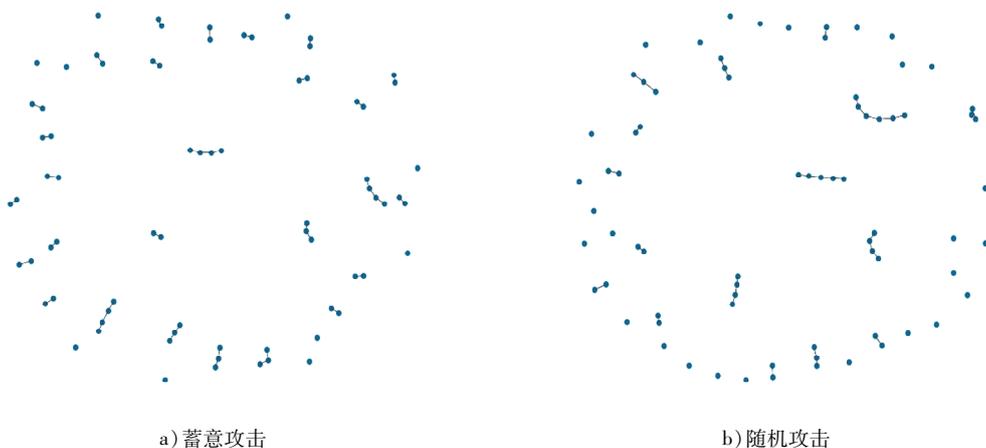


图6 第120次蓄意攻击与随机攻击后的网络状态

3.2.3 基于连边介数攻击的网络抗毁性分析

连边介数用于量化城市轨道交通网络中关键路径的重要性,高介数连边通常是多条最短路径的共同

通道,是运营监控与防护的重点。基于连边介数的随机攻击与蓄意攻击下城市轨道交通网络性能变化如图7所示。

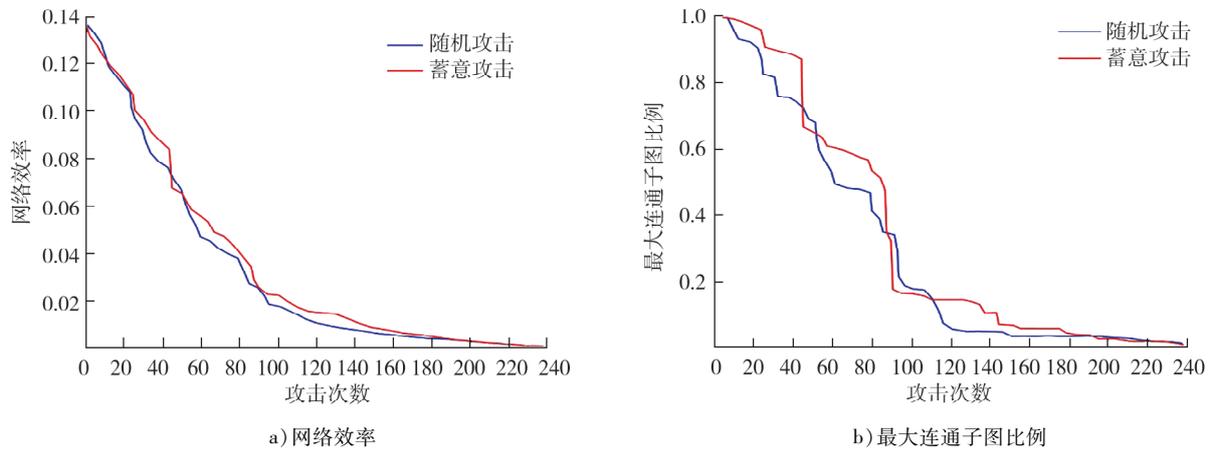


图7 基于连边介数的随机攻击与蓄意攻击下城市轨道交通网络性能变化

由图7可知:按连边介数进行蓄意攻击和随机攻击对网络效率的影响差异较小,主要原因是城市轨道交通网络的集聚性较强,节点间连接较紧密。基于连边介数的攻击每次仅移除有限的键连边,即使经过多次攻击,仍难以快速削减网络中高度连通的中心节点,网络效率与最大连通子图比例下降较缓慢^[26]。网络中有91.28%的节点度大于1,单次连边攻击后仍存在冗余路径,进一步削弱攻击的即时效用。与图5结果对比可知,节点攻击对城市轨道交通网络抗毁性的影响显著高于连边攻击,说明在拓扑层面关键节点的失效比关键连边失效更易引发网络性能急剧下降。

4 关键节点和关键连边识别

石家庄城市轨道交通(规划)网络对基于连边的蓄意攻击表现出较强的抗毁性,对基于节点的蓄意攻击表现较弱的抗毁性,表明节点在网络连通性中的重要性比连边强。在网络拓扑结构中,即使某些度和介数均较小的节点或连边失效仍可能引发网络连通性的显著衰退,其拓扑脆弱性可能远超静态参数所表征的结果。为更全面识别网络中的薄弱环节,综合考虑单个节点及单条连边失效对网络性能的影响,以便识别城市轨道交通的关键节点与连边。

4.1 关键节点识别

在轨道交通网络中,关键节点是指对网络连通性与运行效率有显著影响的节点。为准确识别此类节点,模拟单节点失效,以节点失效后网络效率变化率 ω (初始网络效率与失效后的网络效率差值的绝对值与初始网络效率之比)作为量化节点重要性的指标。具体步骤为:按节点编号依次模拟节点失效,每次仅移除1个节点,计算此时的网络效率,之后将网络恢复至初始状态,再对下一节点重复上述操作,直至所有节点均被模拟失效一次,模拟结果如图8所示。由图8可知:单个节点失效后通常会导致网络效率下降,但少数节点(如度为1的末端节点)失效后网络效率反而略升,可能源于局部路径的简化;不同节点失效对网络效率影响差异显

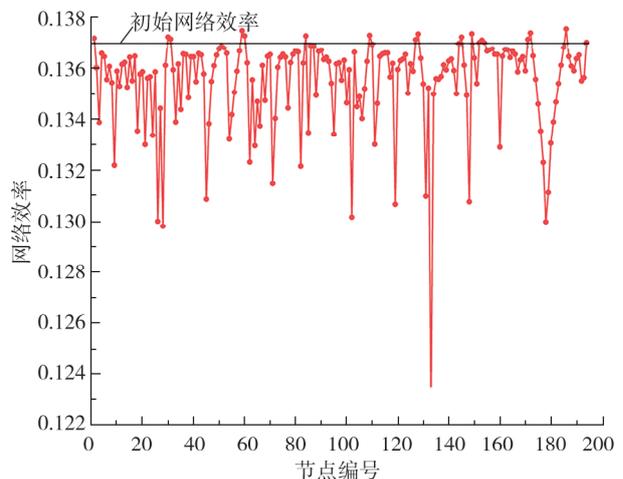


图8 单个节点失效后的网络效率变化

著,其中,二十里铺站失效后网络效率下降最明显,其次是福泽站和小岗上站。

识别对网络效率影响最大的前 10 个关键节点,其网络拓扑指标如表 1 所示。由表 1 可知:节点的介数、度与其对网络效率的影响并非正相关关系,例如,二十里铺站的节点介数和度均非最大,但其失效引起的网络效率降幅最大。

表 1 识别的关键节点及其网络拓扑指标

排名	编号	节点	节点度	节点介数	$\omega/\%$	排名	编号	节点	节点度	节点介数	$\omega/\%$
1	133	二十里铺	5	3 793	10.33	6	119	解放大街	4	5 501	4.47
2	28	福泽	4	1 834	5.11	7	148	陈章	4	5 078	4.40
3	178	南辛庄	2	1 665	4.97	8	45	柳林铺	4	5 005	4.33
4	26	商务中心	4	2 945	4.96	9	131	珠江大道	2	1 107	4.24
5	102	长泰路	6	4 175	4.84	10	179	小岗上	2	1 148	4.14

4.2 关键连边识别

参照关键节点识别方法,通过模拟单条连边失效引起的网络效率变化率,评估连边的重要性,采用攻击单条连边的方式识别关键连边,模拟结果如图 9 所示。

对比图 8、9 可知:连边失效导致的网络效率变化幅度普遍小于节点失效,但任意连边失效均会对网络效率产生负面影响,单条连边失效后的网络效率均小于初始网络效率。

识别对网络效率影响最大的前 10 条关键连边,其网络拓扑指标如表 2 所示。由表 2 可知:对网络效率影响最大的连边是二十里铺站—南辛庄站,网络效率降低 5.89%;其次为南辛庄站—小岗上站,网络效率降低 5.05%;第三为小岗上站—珠江大道站,网络效率降低 4.32%;连边介数对网络效率的影响并非正相关关系,例如,解放大街站—陈章站的连边介数最大,但其失效引起的网络效率变化率仅排名第 10 位。

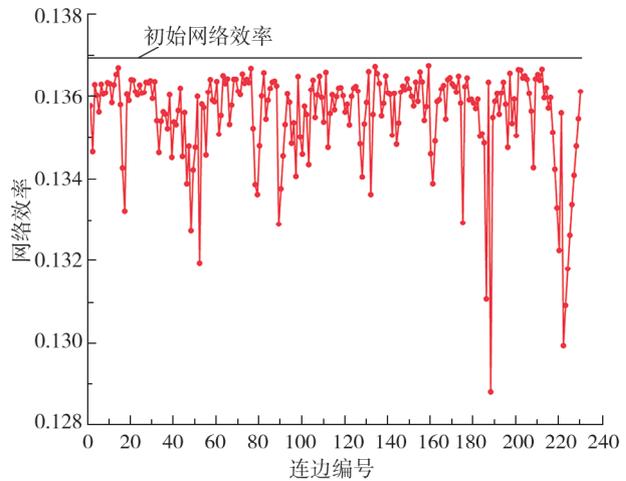


图 9 单条连边失效后网络效率变化

表 2 识别的关键连边及其网络拓扑指标

排名	编号	连边	连边介数	$\omega/\%$	排名	编号	连边	连边介数	$\omega/\%$
1	133—178	二十里铺站—南辛庄站	1 850	5.89	6	79—176	宋村站—东二环南路	950	3.39
2	178—179	南辛庄站—小岗上站	1 674	5.05	7	180—181	宋营站—小西帐	1 134	3.07
3	179—131	小岗上站—珠江大道站	1 469	4.32	8	26—106	商务中心站—朱河站	764	2.99
4	131—180	珠江大道站—宋营站	1 316	3.67	9	54—55	罗家庄站—褚福屯站	950	2.86
5	28—54	福泽站—罗家庄站	1 134	3.56	10	119—148	解放大街站—陈章站	3 501	2.83

识别的关键节点及关键连边分布如图 10 所示。由图 10 可知:关键节点主要分布在 1、7、9 号线上,关键连边主要分布在 2、4、7、9 号线上。

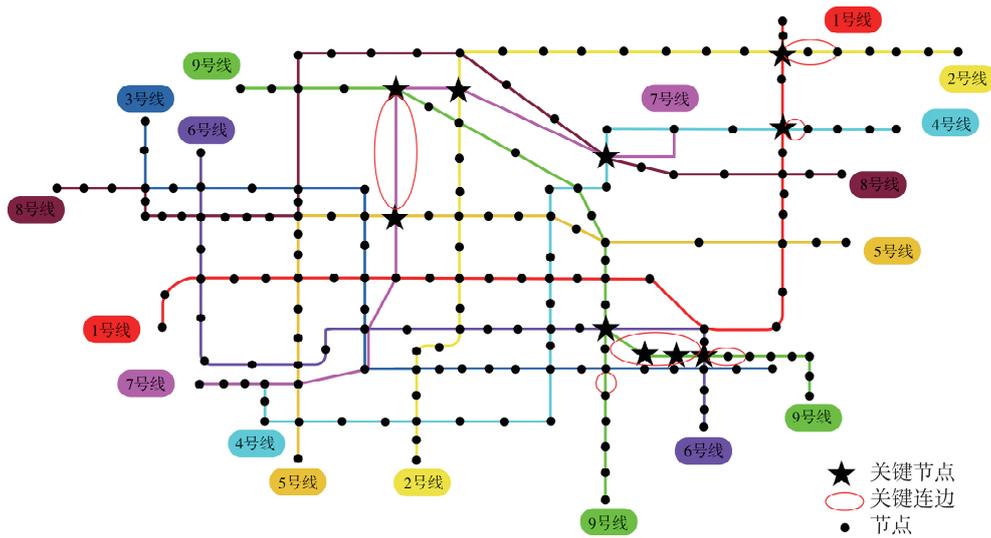


图 10 关键节点及关键连边分布图

4.3 建议措施

城市轨道交通是城市公共交通的骨干系统,为提高石家庄城市轨道交通(规划)网络的鲁棒性与运营韧性,提出以下建议。

1) 强化关键站点与区间防护。应优先加强对二十里铺站、福泽站等关键站点及关键区间的监测、维护与应急保障,将其纳入安全管理的核心范畴。

2) 优化网络拓扑结构。在后续线路规划中,可适当提高换乘站点在所有站点中的占比,提高网络的聚类系数,优化网络连通性^[27],提高网络容错性;增加并行路线,当某条区间或者站点出现故障时,网络中需存在可替代路径,以便保持网络的正常运行,使网络具有更强的抗毁能力。

3) 建立多模式交通应急联运体系。针对关键站点与区间,预置并优化应急公交接驳方案。例如,若1号线西王站至谈固站区间发生故障,可即时加密石家庄市1路公交的运营频次,形成轨道交通—地面公交应急联运网络,有效缓解城市轨道交通网络突发中断对乘客出行的影响。

5 结束语

本文基于 Space-L 方法构建石家庄城市轨道交通(规划)网络拓扑结构图,根据复杂网络理论,进行随机攻击与蓄意攻击场景的模拟与拓扑指标的量化评估,分析网络抗毁性。

1) 通过计算网络平均路径长度、聚类系数及节点度分布,并与相同规模的随机网络进行对比,发现该规划网络的小世界网络指数 $s = 1.110\ 3 > 1.000\ 0$,且度分布近似服从泊松分布,表明石家庄城市轨道交通(规划)网络具有小世界网络的基本特性。

2) 设计 6 类不同的攻击策略,评估网络在随机攻击与蓄意攻击场景下的抗毁性。模拟结果显示:网络受到基于节点度或介数的蓄意攻击时表现为显著脆弱性,关键节点的失效易引发网络效率与最大连通子图比例急剧下降;基于连边介数的蓄意攻击和随机攻击对网络性能的破坏作用相对有限,反映了网络对关键连边失效具备一定的结构冗余与耐受能力。

3) 通过模拟单个节点或单条连边失效,识别对网络效率影响较大的关键节点与关键连边。节点和连边的静态拓扑指标(度、介数)与其失效所引起的实际网络性能下降不存在正相关关系。说明仅依靠传统拓扑参数可能低估或高估某些网络单元的实际重要性。

未来研究可进一步融合动态客流数据与运行图仿真,开展多情景下的抗毁性模拟,探索在成本约束下的网络拓扑优化与韧性提高方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马敏, 胡大伟, 刘杰, 等. 基于客流加权的城市轨道交通网络抗毁性分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12):141-149.
- [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(3):41-49.
- [4] 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(7):39-45.
- [5] ZHANG J H, WANG S L, WANG X Y. Comparison analysis on vulnerability of metro networks based on complex network[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 496: 72-78.
- [6] XU X G, XU C, ZHANG W X. Research on the destruction resistance of giant urban rail transit network from the perspective of vulnerability[J]. Sustainability, 2022, 14(12):7210.
- [7] 张晨, 梁亦辰, 彭朋, 等. 西安地铁网络节点重要性评估[PP]. 铁道标准设计. (2024-09-26) [(2025-03-16)]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202404010013>.
- [8] 高超, 蒋世洪, 王震, 等. 基于动态客流的城市轨道交通关键站点识别[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(9):1490-1506.
- [9] 霍非舟, 曲方新, 马亚萍, 等. 城市地铁有向加权网络级联失效模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(12):143-149.
- [10] 路庆昌, 崔欣, 谢驰, 等. 城市轨道交通网络关键站点识别方法对比与分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(3):18-25.
- [11] 涂敏, 韩雨濛. 改进TOPSIS法的武汉城市轨道交通节点重要度评估[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(9):113-121.
- [12] MENG Y Y, TIAN X L, LI Z W, et al. Exploring node importance evolution of weighted complex networks in urban rail transit[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 558: 124925.
- [13] 王亭, 张永, 周明妮, 等. 融合网络拓扑结构特征与客流量的城市轨道交通关键节点识别研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6):201-211.
- [14] 潘恒彦, 张文会, 胡宝雨, 等. 城市公交-地铁加权复合网络构建及鲁棒性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11):2582-2591.
- [15] 张英贵, 陆强, 高全, 等. 基于关键站点识别的区域轨道交通路网抗干扰性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7):1845-1853.
- [16] 强添纲, 赵明明, 裴玉龙. 城市多模式交通网络的复杂网络特性与鲁棒性研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(1):65-71.
- [17] 左忠义, 刘泽宇, 杨广川. 基于引力影响模型的轨道交通网络关键节点识别研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(1):102-112.
- [18] 崔欣, 路庆昌, 徐鹏程, 等. 基于重要性贡献矩阵的城市轨道交通关键站点识别[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9):2524-2531.
- [19] DENG Y L, LI Q M, LU Y, et al. Topology vulnerability analysis and measure of urban metro network: the case of Nanjing[J]. Journal of Networks, 2013, 8(6):1350-1356.
- [20] ZHOU J, SHAO Y H. Rational selection of rail transit emergency site using complex network topology and genetic algorithm[J]. Scientific Programming, 2022, 2022(1):6420806.
- [21] FENG S M, XIN M W, LV T L, et al. A novel evolving model of urban rail transit networks based on the local-world theory[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 535: 122227.
- [22] KOPSIDAS A, KEPAPTSOGLOU K. Identification of critical stations in a metro system: a substitute complex network analysis[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, 596: 127123.
- [23] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684):440-442.
- [24] 吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2):128-131.
- [25] YANG Y H, LIU Y X, ZHOU M X, et al. Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory:

a case study of the Beijing Subway[J]. *Safety Science*, 2015, 79: 149–162.

[26] 沈犁, 向阳, 王周全, 等. 城市公共交通复合系统抗毁性仿真研究[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(9): 105–112.

[27] DU Z Y, TANG J J, QI Y, et al. Identifying critical nodes in metro network considering topological potential: a case study in Shenzhen City: China[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 539: 122926.

Resilience analysis of urban rail transit networks integrating complex networks and attack simulation

WANG Zhongzheng¹, XU Yuqing^{2,3*}

1. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

2. School of Management, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

3. School of Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

Abstract: To systematically evaluate the ability of urban rail transit networks to withstand uncertain disruptions, this study takes the Shijiazhuang urban rail transit (planned) network as the research object. Based on complex network theory, an undirected and unweighted topology is constructed using the Space-L method. Network characteristics are identified by computing topological parameters such as degree distribution, average path length, and clustering coefficient. Six attack strategies covering node and edge failures are designed, and network resilience under random and targeted attacks is assessed using network efficiency and the proportion of the largest connected component. Critical nodes and edges are identified through sequential single-node and single-edge failure experiments. Results show that, compared with a corresponding random network, the Shijiazhuang (planned) network yields a small-world index of $s = 1.1103 > 1.0000$, and its degree distribution approximately follows a Poisson distribution, indicating small-world properties. The network is sensitive to targeted attacks based on node degree and node betweenness, while it exhibits stronger robustness to attacks based on edge betweenness. The impacts of different node or edge failures on network efficiency vary markedly, and static topological indicators (degree, betweenness) are not in a simple positive correspondence with the actual performance degradation caused by their failures. Resilience should be enhanced by strengthening the protection of critical stations and track sections, optimizing the network topology, and establishing a multimodal emergency intermodal system.

Keywords: urban rail transit; complex network; resilience; critical node; critical edge

(责任编辑:赵玉真)