

文章编号: 1003-1421(2026)10-0055-09

引用格式: 张晨, 梁亦辰, 陈晓轩. 基于复杂网络的城市轨道交通网络韧性研究[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(10): 55-63.

ZHANG Chen, LIANG Yichen, CHEN Xiaoxuan. Research on Resilience of Urban Rail Transit Networks Using Complex Network[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(10): 55-63.

基于复杂网络的城市轨道交通网络韧性研究

张晨¹, 梁亦辰², 陈晓轩³

(1. 西安交通工程学院 交通运输学院, 陕西 西安 710300; 2. 长安大学 交通运输工程学院, 陕西 西安 710064; 3. 陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 城市轨道交通作为城市关键基础设施, 由于自然灾害、突发事件及运营故障等扰动, 网络的脆弱性逐渐凸显, 城市轨道交通网络韧性研究具有重要现实意义。基于复杂网络理论, 构建以客流加权的西安地铁网络模型, 并提出了效能韧性与规模韧性2项测度指标。通过仿真模拟随机攻击、初始度攻击、初始介数攻击、重计算度攻击和重计算介数攻击5种策略下的网络性能衰减过程, 系统评估西安地铁网络的韧性。结果表明: 西安地铁网络度分布服从高斯分布, 兼具小世界与无标度部分特性; 在随机攻击下网络表现出良好的韧性, 性能下降平缓; 而在蓄意攻击下, 尤其是基于介数的攻击策略, 网络异常脆弱, 少量关键节点失效即导致网络效率与连通性急剧崩溃。效能韧性测度相较于规模韧性对网络破坏更为敏感。研究结果可为西安地铁网络的优化规划与应急管理提供理论依据和决策支持。

关键词: 城市轨道交通; 复杂网络; 网络韧性; 攻击策略; 西安地铁

中图分类号: U298.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251109002

Research on Resilience of Urban Rail Transit Networks Using Complex Network

ZHANG Chen¹, LIANG Yichen², CHEN Xiaoxuan³

(1. School of Traffic and Transportation, Xi'an Traffic Engineering University, Xi'an 710300, Shaanxi, China; 2. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Provincial Transport Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: Urban rail transit serves as a critical urban infrastructure, and networks are increasingly vulnerable to disruptions caused by natural disasters, emergencies, and operational failures. Therefore, research on the resilience of urban rail transit networks is of significant practical importance. Based on complex network theory, a passenger flow-weighted model of the Xi'an Metro network was constructed, and two metrics, performance resilience and scale resilience, were proposed. To systematically evaluate the resilience of the Xi'an Metro network, the process of network performance degradation was simulated under five attack strategies: random attack, initial degree attack, initial betweenness attack, recomputation degree attack, and recomputation betweenness attack. The results show that the degree distribution of the Xi'an Metro network follows a Gaussian distribution, exhibiting characteristics of both small-world and scale-free

收稿日期: 2025-11-09 修订日期: 2026-09-15

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划项目(25JK0150)

components. Under random attacks, the network demonstrates good resilience with a gradual performance decline. However, under deliberate attacks, especially betweenness-based attacks, the network is exceptionally vulnerable; the failure of even a few critical nodes can lead to a sharp collapse in network efficiency and connectivity. Performance resilience is more sensitive to network damage than scale resilience. The research results can provide theoretical basis and decision support for the optimization planning and emergency management of the Xi'an Metro network.

Keywords: Urban Rail Transit; Complex Network; Network Resilience; Attack Strategy; Xi'an Metro

0 引言

城市轨道交通系统作为现代化大都市的“动脉”，其安全可靠运行对城市生命线保障与社会经济稳定具有决定性意义。同时，城市轨道交通系统存在自然灾害、设备故障、突发公共事件及人为破坏等多重不确定风险^[1-2]，扰动事件可能通过网络拓扑产生级联效应，暴露出网络固有的脆弱性。如何提升系统韧性已成为重要议题。

张翥然等^[3]的综述指出复杂网络理论在提升韧性方面具有显著潜力；李僖等^[4]基于复杂网络理论构建了城市轨道交通网络模型并分析了拓扑特性；Kopsidas等^[5]开发了考虑中断期间替代服务的地铁站临界度评估方法；Wang等^[6]提出改良加权k-壳模型；Jiang等^[7]创新性地提出BMRank方法。随后，学者们转向融合客流动态的综合韧性评估：叶茂等^[8]设计了改进的耦合映像格子模型；李航等^[9]提出加权改进介数方法；王佳等^[10]构建了融合客流规模与系统延误的网络性能指标；陈津怡等^[11]提出考虑拓扑与客流分布均衡性的评估方法；Gao等^[12]建立了可追踪的并行评估框架；Ma等^[13]从吸收、抵抗和恢复三维度构建评估体系。针对系统恢复问题，马敏等^[14]建立了以网络韧性最大化为目标的恢复优化模型；张开冉等^[15]构建了基于修复策略的双层模型；Chen等^[16]制定了基于列车时刻表的评估方法；Yin等^[17]通过多场景中断模型评估不同故障站点的影响。

现有研究仍存在待深化之处：评估指标多采用静态或单一视角，难以量化网络在不同攻击阶段对不同路径的效率损失敏感度；缺乏能系统调节评估侧重点且具备明确参数解释的理论模型。为此，以西安地铁网络为例，聚焦其棋盘式路网结构与高集聚性客流特征，构建融合复杂网络理论与客流数据的韧性评估框架，为网络优化规划、应急资源配置

与智能调度决策提供理论借鉴。

1 城市轨道交通网络韧性评估方法

针对城市轨道交通网络韧性的综合评估，构建包含效能与规模双维度的量化指标体系，引入参数化的广义效能韧性测度，建立非线性规模韧性模型。在此基础上，结合动态重计算的蓄意攻击模拟与多次重复的随机攻击实验，系统分析网络在不同失效场景下的响应，从而形成一套兼具理论严谨性与实践指导性的韧性评估框架。

1.1 网络模型构建

在构建网络模型时，选用Space L空间映射法进行拓扑建模。该方法通过考虑节点间的空间距离与空间分布特征，能够更真实地反映城市地理空间的实际结构，从而全面评估节点间的空间关联性，有效揭示地铁网络中节点的空间分布规律^[18]。基于此方法，构建以客流数据为权重的网络模型，将各地铁站点抽象为网络节点，将相邻站点间的运营线路抽象为网络边，仅当两站点在实际运营中前后相邻时，才在模型中建立连接关系。

在数学表达上，传统拓扑网络通常定义为结构 $G=(V, E)$ ，其中 V 表示网络节点集合， E 表示边集合。在网络的邻接矩阵中，元素 a_{ij} 用于表征节点间的连接状态：当节点 V_i 与 V_j 相邻且存在边连接时， $a_{ij}=1$ ，否则 $a_{ij}=0$ ^[19]。采用加权网络模型，将其扩展为 $G=(V, E, W)$ 的形式，其中 W 为有向边权重集合。具体而言，权重定义 $W=\{pf_{e_{ij}}(\Delta t)\}$ ，其中 $pf_{e_{ij}}(\Delta t)$ 表示在时间区 Δt 内通过 $i-j$ 断面的全日客流量，以此作为边的权重值，从而构建一个融合客流特征的功能性网络，城市轨道交通网络拓扑结构示意图如图1所示，图1为抽象化拓扑结构示意图，用于说明网络建模的一般性方法。

1.2 网络韧性评估体系

为全面刻画西安地铁网络在扰动下的响应与性

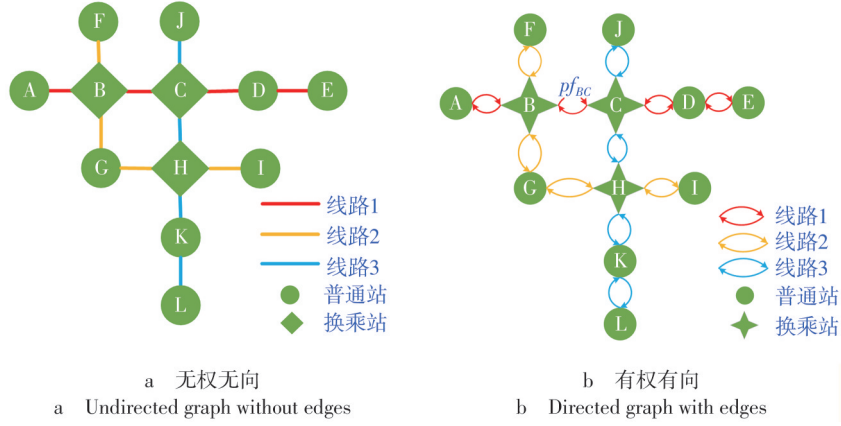


图1 城市轨道交通网络拓扑结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of urban rail transit network topology

能维持能力,从结构性与功能性2个维度,构建一套综合性的韧性评估指标体系。该评估体系整合了中心性指标、网络效率与最大连通子图3类指标,系统性揭示网络在不同扰动下的响应机制。具体而言,中心性指标作为结构识别的先验工具,能够准确辨识网络中在连通性与客流承载方面具有关键作用的枢纽节点,从而预先揭示其结构性脆弱环节;网络效率则从全局功能维度出发,量化乘客在网络中通行的便捷程度,其动态变化直观刻画了网络运输功能的退化过程与维持状态;而最大连通子图侧重于评估网络在遭受攻击或发生故障后基本连通结构的存续能力,是判断系统整体性与服务覆盖范围的基础依据。通过综合分析上述3类指标在随机性与蓄意性攻击场景下的动态响应特征,不仅能够诊断西安地铁网络的静态结构弱点,更能从结构性与功能性2个维度,对系统在扰动中所表现出的抵抗、适应与恢复能力实现系统化的量化评估与机理揭示。

1.2.1 站点中心性测度

节点度 D_i 是衡量节点 i 的中心性和重要性的最直接的指标,它是指连接到主体节点的节点数,反映了连接数量^[20],可表示为

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为两节点的位置关系,当 i, j 两节点相连时, $a_{ij} = 1$, 否则为0。

D_i^w 客流加权后的节点度值,可表示为

$$D_i^w = \sum_{j \in V_i} pf_{e_{ij}}(\Delta t) \quad (2)$$

式中: $j \in V$ 为节点 j 应属于网络节点集 V ; $pf_{e_{ij}}(\Delta t)$ 为

在时间区间 Δt 内,从 i 到 j 的断面客流量(即通过 $i-j$ 区间的客流量)。

累积度分布被定义为节点度大于或等于 K 的概率,城市轨道交通网络的度分布特性可以用对应的分布函数来描述^[21]。利用这种方法可以准确地揭示网络的拓扑结构特性,可表示为

$$p_k = \sum_{k' \geq k} p(k') \quad (3)$$

式中: p_k 为节点度大于 k 的概率; $p(k')$ 为节点度为 k' 的概率。

节点介数中心性 B_i 为所有节点对之间通过节点 i 的最短路径的数量与所有节点之间的最短长度之和比^[22], B_i^w 为客流加权后的节点介数值,可表示为

$$B_i = \frac{\sum_{o \neq d \neq i} n_{od}}{\sum_{o \neq d} n_{od}} \quad (4)$$

$$B_i^w = \frac{\sum_{l=1}^n \sum_{x \in l} w_l^{i,x}}{\sum_{l=1}^n \sum_{x \in l} w_l^x} \quad (5)$$

式中: n_{od} 为网络中最短路径的数量; $w_l^{i,x}$ 为网络中经过节点 i 的最短路径上的客流量和; w_l^x 为网络中所有最短路径上的客流量之和。

城市轨道交通网络的平均路径长度是网络中所有节点之间最短路径长度的算术平均值,用来表示网络中各节点之间的关联紧密程度^[23],可表示为

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{1 \leq i \leq j \leq N} d(v_i, v_j) \quad (6)$$

式中: N 为节点数,分母 $N(N-1)$ 是节点对总数;

$d(v_i, v_j)$ 为第*i*个节点与第*j*个节点之间的距离；分子乘以2是因为无向图中 (i, j) 和 (j, i) 视为同一对。对于有向图，需计算所有有序节点对 $(i, j)(i \neq j)$ 的最短路径。

聚类系数是复杂网络局部有序性的量化指标，揭示节点邻居间的连接紧密程度^[24]，与平均路径长度共同构成小世界网络的核心特征，可表示为

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (7)$$

式中： $k(i)$ 为邻居节点数量； $\frac{k_i(k_i - 1)}{2}$ 为邻居节点最多可能存在的边； E_i 为实际存在边数。

1.2.2 网络韧性测度

为了评估西安地铁网络的韧性，将韧性测度量化，主要从效能韧性、规模韧性2种测度出发，以便直观地了解不同攻击策略下的网络韧性变化。

效能韧性测度是指攻击后网络节点实际最短路径长度倒数加和与初始网络节点对间最短路径长度倒数加和的比值^[25]，用于评价网络的连通性强弱和全局效率。该测度基于广义网络效率的概念，并最终以其相对损失比例来量化，其核心是引入一个单调递增的权重函数，可表示为

$$\beta(d_{ij}) = d_{ij}^{-\alpha} \quad (8)$$

式中： β 为权重系数； d_{ij} 为节点*i*与*j*之间的最短路径长度； α 为幂指数参数。

该函数通过指数参数 α 来调节对路径长度的敏感程度，随着关键节点失效，效率损失急剧增加，该测度会加速上升，从而放大了对关键节点失效的警示信号。

基于此，定义任意网络状态的广义效率 E_g ，可表示为

$$E_g = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}^{-\alpha} \quad (9)$$

效能韧性的核心是衡量系统性能的下降程度。故定义效能韧性损失度 H_E 为攻击前后网络广义效率的相对下降比例，可表示为

$$H_E = 1 - \frac{E'_g}{E_g^0} = 1 - \frac{\delta}{\delta_0} \quad (10)$$

式中： E'_g 为公式(9)计算得到的攻击后效率，记为 δ ； E_g^0 为公式(9)计算得到的初始效率，记为 δ_0 。

规模韧性是评估网络在遭受攻击后保持其结构

完整性的关键指标，通常以网络最大连通子图的演变作为量化依据。最大连通子图的节点数量直接反映了网络的现有规模，最大连通子图的相对大小*S*作为衡量网络结构完整性的核心基础变量，可表示为

$$S = \frac{N'}{N} \quad (11)$$

式中： N' 为攻击后最大连通子图的节点数，其数值越大，表明网络在受损后仍能维持较大范围的连通区域。

随着节点或边的持续删除，网络结构逐渐碎片化，可能分裂为多个孤立子图，导致其整体规模不断缩减。为消除网络初始规模的影响并实现标准化度量，定义规模韧性指数 S_e 为一个基于指数函数的转化值，以强调网络连通性在面临崩溃时的韧性，该模型反映了10%的重要节点失效可能造成50%的规模韧性丧失的效应，可表示为

$$S_e = \exp(\theta(S - 1)) = \exp(\theta(\frac{N'}{N} - 1)) \quad (12)$$

式中： θ 为衰减调节参数； S 为网络剩余规模比例。

2 案例研究

2.1 西安地铁网络模型

西安地铁以东西向的1号线、南北向的2号线为核心“十字”骨架，并逐步扩展为环放式的网络形态。为准确刻画轨道交通运营的方向性特征，充分考虑了线路上下行方向的独立性与各路段客流分布的差异性，研究范围覆盖西安市运营中的10条地铁线路，包括1号线、2号线、3号线、4号线、5号线、6号线、8号线、9号线、14号线及16号线，按照网络演化规律，将其开通站点划分为4个阶段，分别为第1阶段，第2阶段，第3阶段与第4阶段。基于2024年底西安市地铁运营线路数据，构建完整的网络拓扑结构，西安地铁网络拓扑结构如图2所示。该网络共包含208个节点和235条边。为便于分析，对208个运营站点按其开通时间顺序进行了系统编码。需要特别说明的是，对于换乘站点，在编码过程中沿用其首次开通时所属线路的既有编码，以保持数据的一致性与连续性。

案例所用数据集来源于西安市政务数据资源网、西安市城市轨道交通运营集团AFC系统(客流的OD量和各站点的进出站量)，经路径分配后得到

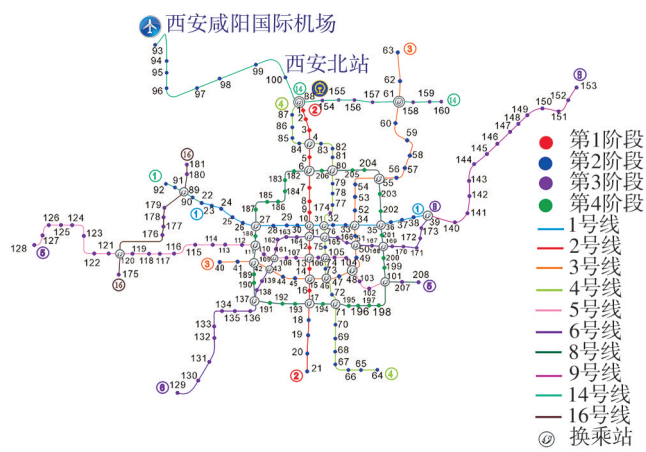


图2 西安地铁网络拓扑结构
Fig.2 Topological structure of Xi'an Metro network

断面客流量，并将其作为网络边的权重。不同年份的西安地铁网络空间结构数据库借助 ARCGIS 平台，经过了数字化处理，计算基于 MyEclipse 平台自编程序来实现。数据集采用 PostgreSQL 清洗去噪，客流数据集的收集时间范围为 6:00—24:00，主要利用 2024 年全日客流数据进行西安地铁网络建模与分析。

由 Space L 模型构建的西安地铁网络静态特征基本参数如表 1 所示。可以看出，西安地铁网络的平均节点度为 2.126，这与城市轨道交通路网的拓扑结构特征相一致，除换乘节点外，大多数节点的度为 2，少数边缘站的度为 1，随着网络复杂程度增大，网络连通性及平均节点度将有显著提升。

2.2 网络静态分析

在复杂网络分析中，节点度是表征其局部连通性的核心度量，其数值由与该节点存在直接邻接关系的节点数量决定，直观反映节点在网络中的直接

交互潜力。通过计算西安地铁网络中各节点度值，发现大部分站点的度集中在 2~4，表明这些站点通常连接 2~4 条线路。西安地铁网络各个度值节点个数与比例如表 2 所示。进一步分析度分布，发现西安地铁网络的度分布呈现一定的规律性，但并不完全符合幂律分布，说明其不具有典型的无标度特性，西安地铁网络累计度分布如图 3 所示。

表 1 西安地铁网络静态特征基本参数

Tab.1 Static characteristic parameters of Xi'an Metro network

静态特征	值	西安地铁网络特性
度	3.0	网络中平均每个节点与 3 个节点相连
平均路径长度	2.547 1	网络中任意 2 个节点到达平均需要经过 10 条边
集聚系数	0.690 3	网络中不具有明显的小世界特性
直径	5	网络中最远距离节点到达需要经过 5 条边
点平均介数	0.045	网络中任意 2 个节点最短路径通过各个节点的概率是 0.045
边平均介数	0.044	网络中任意 2 个节点最短路径通过各条边的概率是 0.044
度分布	幂律分布	网络不具有无标度特性

表 2 西安地铁网络各个度值节点个数与比例

Tab.2 Number and proportion of nodes of each degree value in Xi'an Metro network

度值	1	2	3	4	5	6
节点个数/个	12	95	58	26	10	7
比例/%	0.058	0.457	0.279	0.125	0.048	0.034

为深入探究西安地铁网络的拓扑特性，对其度分布曲线进行了拟合分析。通过引入多项式分布、幂律分布与高斯分布 3 种函数模型进行拟合对比，西安地铁网络节点度分布拟合曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出，西安地铁网络节点度分布服从高斯分布，高斯曲线拟合函数可用公式(13)表示。由于西安地铁网络度分布并不遵循幂律分布，所以西安

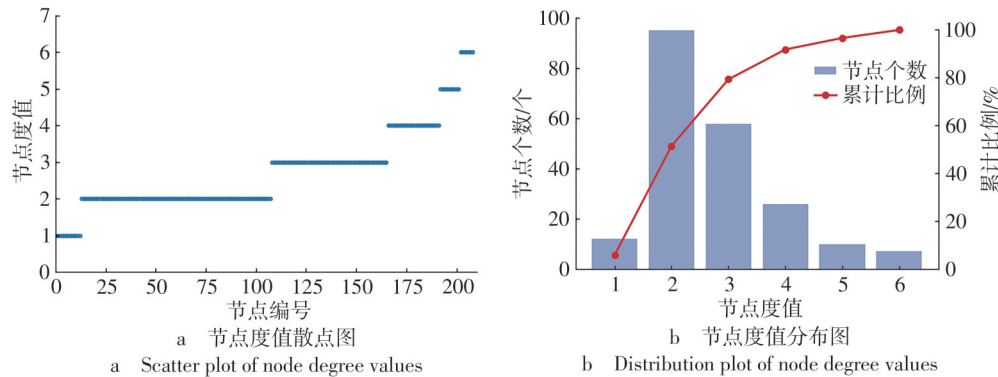


图3 西安地铁网络累计度分布
Fig.3 Cumulative distribution of node degrees in Xi'an Metro network

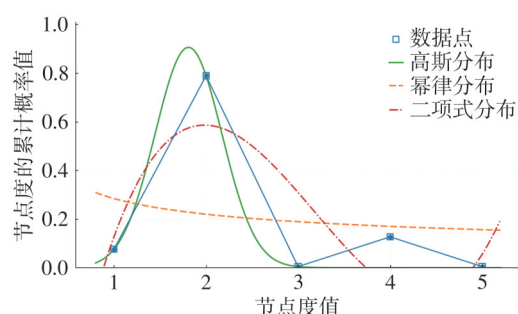


图4 西安地铁网络节点度分布拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of node degree distribution for Xi'an Metro network

地铁网络不完全具有无标度特性，且有部分特征。

$$p(k_i) = 0.3089 \times e^{-\left(\frac{k_i - 0.8113}{0.6457}\right)^2} \quad (13)$$

2.3 网络性能评估

为模拟现实系统中随机故障与针对性破坏对网络的影响，设计随机攻击与蓄意攻击节点移除策略。其中蓄意攻击以节点度值及介数值来实施节点攻击。

轨道交通网络韧性分析如图5所示，从变化趋势来看，网络效率与最大连通子图比例均随攻击比例增加而逐渐下降。在随机攻击下，网络效率呈近似线性下降，初始值为0.1，攻击比例达40%时降至0.025，60%时进一步降至0.02，至100%时完全丧失，整体下降较为平缓；同时，最大连通子图比例从1.0缓慢下降，攻击比例达60%时仍保持在0.3以上，表明网络对随机故障具备一定容忍能力，大量低度节点有助于在随机破坏下维持基本连通性。相比之下，蓄意攻击下网络性能退化显著加剧，网络效率在攻击比例仅为20%时即迅速降至0.02，下降速度约为随机攻击的3倍，且出现明显性能拐

点；最大连通子图比例急剧衰减，基于节点度值的攻击在20%时降至0.3，而基于节点介数值的攻击在15%时便骤降至0.1，接近崩溃状态。这突显了关键枢纽节点的重要性，高度值或高介数值的换乘站点一旦被破坏，整个网络的传输效率与结构连通性将严重受损。西安地铁8号线环线的引入实现了网络结构的根本性变革，通过构建多条绕越核心区域的冗余路径，有效疏解了北大街、钟楼等传统枢纽的换乘压力，使跨区域出行不再完全依赖穿越中心城区的线路，从而提升了全网运行效率与结构韧性。

为进一步对比轨道交通网络中不同类型拓扑结构的韧性表现，本研究开展了相应的模拟实验，不同网络结构韧性对比如图6所示。在随机攻击情境下，小世界网络凭借其较高的聚类系数与较短的平均路径长度，形成了大量局部连接和若干长程冗余路径，使得局部失效难以扩散至全局，因此表现出较强的韧性，整体效率与连通性得以维持。实际轨道交通网络虽在一定程度上具备小世界特征，且随机攻击下抗毁性较好，但由于存在若干关键换乘站，这些节点失效后可能分割局部线路，导致网络性能下降速度略高于理想小世界模型。西安地铁网络则呈现一定的无标度特性，其绝大多数节点度较小，仅少量高度值枢纽节点，随机攻击多移除低连接度的非核心节点，这些毛细血管式节点仍能维持局部连通，使网络整体稳定性较好；相比小世界网络，轨道交通网络在随机攻击下的韧性略低，但优于典型无标度网络。在蓄意攻击场景下，无标度网络因高度依赖枢纽节点，一旦关键节点被优先移

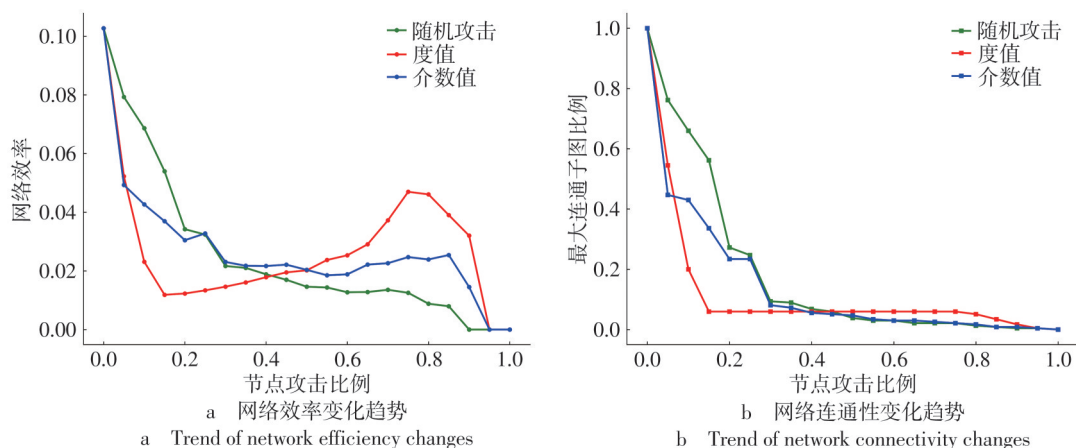


图5 轨道交通网络韧性分析

Fig.5 Resilience analysis of rail transit network

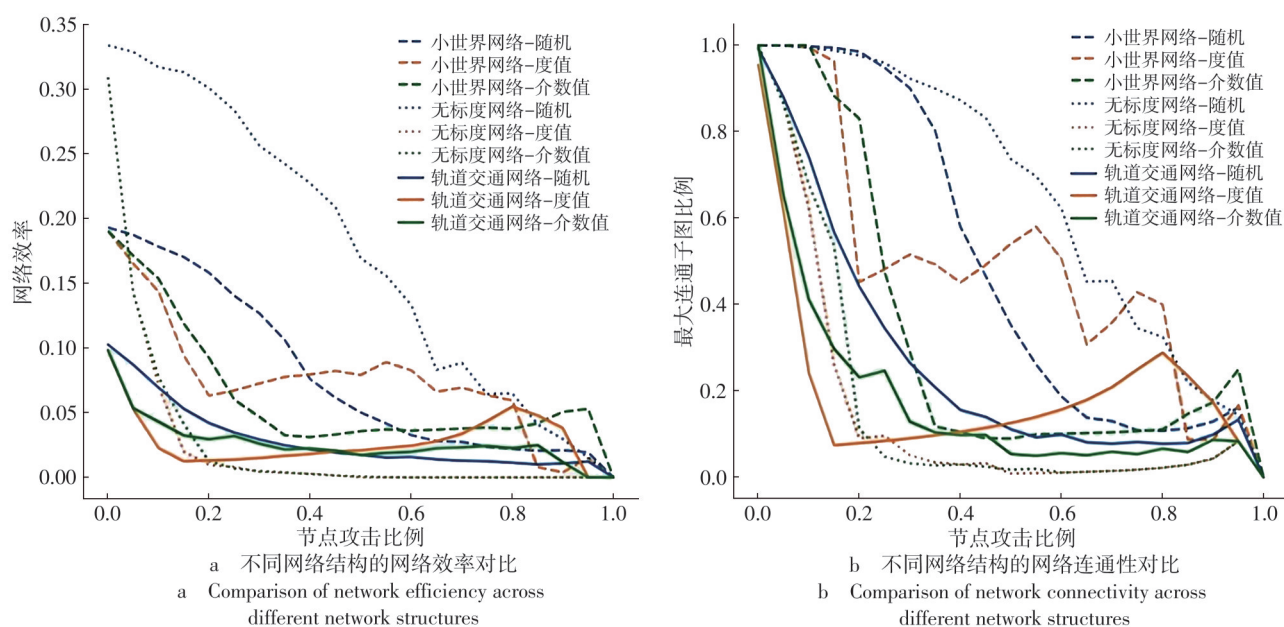


图6 不同网络结构韧性对比
Fig.6 Comparison of resilience for different network structures

除, 网络会迅速分裂为孤立子图, 抗毁性最为脆弱。轨道交通网络虽同样表现出脆弱性, 但由于结构中除主要枢纽外还存在若干次级换车站点, 在关键枢纽失效后仍能局部维持连通, 延缓整体崩溃, 因此受影响程度轻于无标度网络。小世界网络在蓄意攻击下的行为介于两者之间: 其结构具备一定冗余性, 对针对性攻击有一定抵抗能力, 但节点度分布相对均匀, 缺乏极少数超核心节点, 故性能下降较快, 抗毁性弱于轨道交通网络。

2.4 网络发展建议

西安地铁网络兼具小世界与无标度特性。随机攻击下网络表现出较强的抗毁性; 但蓄意攻击关键节点时, 网络性能显著下降。小世界网络因高聚类 and 短平均路径, 随机攻击下鲁棒性强, 但蓄意攻击后抗毁性降低; 无标度网络虽极抗随机攻击, 但蓄意攻击关键节点后性能急剧恶化。针对上述脆弱点, 提出3点优化建议。

(1) 防护关键节点。效能韧性测度对介数节点高敏感, 应强化开远门、金光门、万寿路等枢纽的功能防护, 如增设换乘通道、优化冗余路径; 规模韧性测度对度节点更敏感, 需保障西安北站、小寨、北大街等节点的局部连通性, 配置应急接驳运力。

(2) 优化拓扑韧性。依据蓄意攻击下韧性衰减规律, 在钟楼、行政中心等规模韧性薄弱节点周边

加密支线, 提升节点分布均衡性; 依托8号线环线冗余路径, 加强与北大街、五路口等效能韧性敏感节点的联动, 降低单一节点依赖。

(3) 建立动态应急响应体系。融合物联网与大数据, 实时监测客流与设施状态。针对小寨、通化门等高峰饱和节点, 预设动态疏导方案, 如小寨失效时经大雁塔换乘, 通过智能调度抑制级联失效, 提升恢复力。

3 结论

基于复杂网络理论, 构建了城市轨道交通网络的韧性评估模型, 通过对比随机攻击、度值攻击和介数值攻击等多种策略下的网络效能与最大连通子图动态变化, 系统评估了网络的响应特性, 主要研究结论如下。

(1) 西安地铁网络拓扑呈现混合型结构特征。其平均节点度为2.126, 节点度分布更符合高斯分布而非幂律分布, 不完全具备典型的无标度特性, 而是一种兼具小世界网络高连通效率与无标度网络异构性特征的混合型结构。

(2) 网络在不同攻击策略下韧性表现差异显著。在随机攻击下, 网络效能与最大连通子图规模呈线性缓慢下降, 展现出较强的鲁棒性; 而在蓄意攻击下, 尤其是基于重计算介数的攻击, 仅移除约

15%的关键节点即可导致网络连通性接近瘫痪,其中效能韧性指标对此最为敏感。

(3) 与典型网络模型的对比表明,西安地铁网络的抗攻击能力介于小世界网络与无标度网络之间。其在抗随机攻击方面优于无标度网络但弱于小世界网络;在抗蓄意攻击方面,性能衰减速度更快,脆弱性介于二者之间。

基于上述结论,建议加强对开远门、金光门等高介数中心性关键节点的保障,优化网络布局以分散流量压力,并引入智能调度系统增强动态响应能力,从而有效提升西安地铁网络韧性。本研究方法也可为具有类似棋盘路网结构的城市轨道交通系统提供韧性评估与提升的方法论参考。

参考文献:

- [1] 霍小森,舒鑫宇,焦柳丹. 突发公共卫生事件下城市轨道交通系统适灾韧性评估[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 152-158, 164.
HUO Xiaosen, SHU Xinyu, JIAO Liudan. Disaster Resilience Assessment of Urban Rail Transit Systems under Public Health Emergencies[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(5): 152-158, 164.
- [2] SHEN Z F, JI C J, LU S C. Transportation Network Resilience Response to the Spatial Feature of Hazards[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 128: 104121.
- [3] 张翕然,李正中,张馨,等. 城市轨道交通系统韧性研究现状及展望[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(4): 1-11.
ZHANG Xiran, LI Zhengzhong, ZHANG Xin, et al. Status and Prospects of Studies on Urban Rail Transit Resilience[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(4): 1-11.
- [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.
LI Xi, MA Liang, GUO Jin, et al. Topological Characteristics and Robustness Analysis of Urban Rail Transit Networks[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(7): 39-45.
- [5] KOPSIDAS A, KEPAPTOSGLOU 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.
- [6] WANG L J, ZHANG S C, SZŰCS G, et al. Identifying the Critical Nodes in Multi-Modal Transportation Network with a Traffic Demand-Based Computational Method[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 244: 109956.
- [7] JIANG S H, LUO Z, YIN Z, et al. Identification of Critical Nodes in Urban Transportation Network through Network Topology and Server Routes[C]//Knowledge Science, Engineering and Management. Cham: Springer, 2021: 395-407.
- [8] 叶 茂,孙康宁,唐 坤,等. 考虑站点韧性的轨道交通网络级联失效研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报(2025-09-29)[2025-10-14]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20251175>.
YE Mao, SUN Kangning, TANG Kun, et al. Research on Cascading Failures in Rail Transit Networks Considering Station Resilience [J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering(2025-09-29)[2025-10-14]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20251175>.
- [9] 李 航,高致远,崇熙晓,等. 识别城市轨道交通关键站点和区段的加权改进介数方法:以北京市轨道交通网络为例[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(24): 10441-10448.
LI Hang, GAO Zhiyuan, CHONG Xixiao, et al. Weighted Improved Betweenness Approach for Identifying Key Stations and Sections of Urban Rail Transit: A Case Study of Beijing Rail Transit Network[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(24): 10441-10448.
- [10] 王 佳,陈 翔,林苗朋,等. 基于乘客决策行为的城市轨道交通网络韧性评估[J/OL]. 铁道标准设计(2025-06-27)[2025-10-14]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202412300004>.
WANG Jia, CHEN Xiang, LIN Miaopeng, et al. Resilience Assessment of Urban Rail Transit Networks Based on Passenger Decision-Making Behavior [J/OL]. Railway Standard Design, (2025-06-27)[2025-10-14]. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202412300004>.
- [11] 陈津怡,李铁柱,郭竞文,等. 相继故障下城市轨道交通系统韧性评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 202-208.
CHEN Jinyi, LI Tiezhu, GUO Jingwen, et al. Resilience Assessment Method of Urban Rail Transit System under Cascading Failure[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 202-208.
- [12] GAO Y, WANG J W. A Resilience Assessment Framework for Urban Transportation Systems[J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(7): 2177-2192.

- [13] MA Z A, YANG X, WU J J, et al. Measuring the Resilience of an Urban Rail Transit Network: A Multi-Dimensional Evaluation Model[J]. *Transport Policy*, 2022, 129: 38–50.
- [14] 马 敏, 胡大伟, 舒 兰, 等. 城市轨道交通网络韧性评估及恢复策略[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(2): 396–404.
- MA Min, HU Dawei, SHU Lan, et al. Resilience Assessment and Recovery Strategy on Urban Rail Transit Network[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(2): 396–404.
- [15] 张开冉, 殷苏平, 蒋明君. 城市轨道交通网络韧性优化研究[J]. *安全与环境学报*, 2025, 25(2): 527–535.
- ZHANG Kairan, YIN Suping, JIANG Mingjun. Research on Optimizing the Resilience of Urban Rail Transit Networks[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(2): 527–535.
- [16] CHEN J Q, LIU X W, HU X Y, et al. Resilience Assessment of an Urban Rail Transit Network under Natural Disasters[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2025, 139: 104587.
- [17] YIN Y, CHEN J Q, CHEN Z, et al. A Scenario Model for Enhancing the Resilience of an Urban Rail Transit Network by Adding New Links[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2024, 637: 129583.
- [18] WEN X, SI B F, WEI Y, et al. Resilience Assessment of Urban Rail Transit Systems: A Literature Review[J]. *Public Transport*, 2025, 17(3): 657–681.
- [19] 侯本伟, 游 丹, 范世杰, 等. 基于网络效率的城市轨道交通网络抗震韧性评估[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(3): 509–519.
- HOU Benwei, YOU Dan, FAN Shijie, et al. Seismic Resilience Evaluation of Urban Rail Transit Network Based on Network Efficiency[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(3): 509–519.
- [20] 杨 楠, 王家祺, 魏 杰, 等. 复杂加权网络视角下西北地区铁路网络客运能力研究[J]. *铁道运输与经济*, 2025, 47(12): 99–107, 117.
- YANG Nan, WANG Jiaqi, WEI Jie, et al. Research on Passenger Capacity of Railway Network in Northwest China from Perspective of Complex Weighted Network[J]. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47(12): 99–107, 117.
- [21] 谢丽霞, 孙红红, 杨宏宇, 等. 基于K-shell的复杂网络关键节点识别方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(5): 849–861.
- XIE Lixia, SUN Honghong, YANG Hongyu, et al. Key Node Recognition in Complex Networks Based on the K-shell Method[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(5): 849–861.
- [22] 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.
- [23] FANG C, CHU Y Z, FU H R, et al. On the Resilience Assessment of Complementary Transportation Networks under Natural Hazards[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 109: 103331.
- [24] FERRARI C, SANTAGATA M. Vulnerability and Robustness of Interdependent Transport Networks in North-Western Italy[J]. *European Transport Research Review*, 2023, 15(1): 6.
- [25] 刘婧蕾, 彭其渊, 陈锦渠. 基于贝叶斯网络的区域多制式轨道交通网络韧性评估[J]. *铁道运输与经济*, 2025, 47(3): 151–160.
- LIU Jinglei, PENG Qiyuan, CHEN Jinqu. Resilience Assessment of a Regional Multi-Modal Rail Transit Network Based on Bayesian Network[J]. *Railway Transport and Economy*, 2025, 47(3): 151–160.

(责任编辑 刘宁馨)