文章编号：1003-1421(2026)07-0058-12
引用格式：钱名军，赵婷婷，张兆杰，等. 基于客流加权的城市轨道交通复杂网络抗毁性研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(7)：58-69.
QIAN Mingjun，ZHAO Tingting，ZHANG Zhaojie，et al. Research on Invulnerability of Complex Networks of Urban Rail Transit Based on Passenger Flow Weighting[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(7)：58-69.

基于客流加权的城市轨道交通复杂网络抗毁性研究

钱名军，赵婷婷，张兆杰，张玉召

(兰州交通大学 交通运输学院，甘肃 兰州 730000)

摘 要：城市轨道交通网络作为城市公共交通网络的骨干，其抗毁性直接影响城市交通系统的运营安全。轨道交通网络所承载的客流量，对其网络功能的稳定发挥影响显著。首先，通过引入POI数据计算节点客流量，构建基于客流加权的负载-容量模型，即以节点客流量作为网络初始负载，以节点容量为依托，结合负载分配规则，研究网络结构及其抗毁性。然后，分别采取随机攻击、基于拓扑属性的蓄意攻击、基于负载容量的动态攻击等多种攻击策略，通过级联失效仿真，分析加权网络的抗毁性指标变化。最后，以苏州市轨道交通网络为例加以验证。结果表明：静态抗毁性方面，蓄意攻击下网络表现出脆弱性，而随机攻击下网络的抗毁性有所增强；动态抗毁性方面，传统拓扑指标攻击方式低估了大客流节点的失效高风险，基于客流加权的负载攻击策略对网络级联失效的影响更大；而通过适当调整节点容量参数，即增加节点容量可以显著提高网络抗毁性。

关键词：轨道交通；抗毁性；客流量；负载容量；复杂网络
中图分类号：U293.5 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250930006

Research on Invulnerability of Complex Networks of Urban Rail Transit Based on Passenger Flow Weighting

QIAN Mingjun，ZHAO Tingting，ZHANG Zhaojie，ZHANG Yuzhao

(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: As the backbone of urban public transportation networks, the invulnerability of urban rail transit networks directly affects the operational safety of urban transportation systems. The passenger flow carried by rail transit networks significantly influences the stable performance of network functions. Firstly, by introducing POI data to calculate the node passenger flow, a load-capacity model based on passenger flow weighting was constructed. Taking the node passenger flow as the initial network load and relying on the node capacity, the network structure and its invulnerability were studied in combination with the load distribution rules. Then, various attack strategies, including random attacks, deliberate attacks based on topological attributes, and dynamic attacks based on load capacity, were adopted. Through cascading failure simulations, changes in the invulnerability indicators of the weighted network were analyzed. Finally, Suzhou rail transit network was used as an example for validation. The results show that in terms of static invulnerability, the network exhibits vulnerability under deliberate attacks, while its invulnerability is enhanced under random attacks. In terms of dynamic invulnerability, the traditional topological

收稿日期：2025-09-30 **修订日期**：2026-06-10
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2024X003)

indicator-based attack methods underestimate the high failure risk of nodes with large passenger flow, and the load attack strategies based on passenger flow weighting have a greater impact on network cascading failures. By appropriately adjusting node capacity parameters, namely increasing the node capacity, the network invulnerability can be significantly improved.
Keywords: Rail Transit; Invulnerability; Passenger Flow; Load Capacity; Complex Network

0　引言

随着城市化进程的加快，我国城市轨道交通系统作为支撑现代都市高效运转的核心基础设施，其网络规模与复杂性持续攀升。然而，设备故障、自然灾害或者重大公共安全事件等原因给城市轨道交通系统的安全稳定运营带来严重干扰。因此，为保障城市轨道交通系统的安全稳定运营，对其网络抗毁性进行仿真研究很有必要。

目前，国内外对交通网络抗毁性研究已取得一定成果。Yang等[1]提出一种新的加权综合指数来定义网络中的枢纽站点，仿真分析了不同扰动下北京市地铁系统的鲁棒性。杨景峰等[2]建立了城市轨道交通级联失效模型，通过网络效率和最大连通子图比例两项指标，仿真分析不同攻击策略下网络的鲁棒性。刘朝阳等[3]采用了改进的边权函数对节点流量进行重分配，仿真研究了城市轨道交通网络的抗毁性。吴珊等[4]从关键节点识别和全局脆弱性2个方面，仿真分析了2种攻击模式下全球海运网络的脆弱度变化。Xu等[5]研究了巨大城市轨道交通网络随规模增长时的抗毁性，提出应着重防护因关键站点失效突破阈值而引发的网络故障。Sun[6]构建了多子网复合的级联故障模型，发现城市公交–地铁复合网络的抗毁性受多重关系比例的影响显著。韩紫金等[7]基于超图理论建立了城市轨道交通超网络模型，并提出了负载二次分配策略，仿真分析了不同攻击策略下的网络鲁棒性。Hong等[8]建立了流量–负载级联失效模型，仿真研究了耦合关系、防御时间和负载对网络抗毁性的影响。Sun等[9]构建了考虑连锁故障演化的网络脆弱性指标，动态评估了轨道交通网络的脆弱性。杜斐等[10]采用Space-L方法构建了上海市轨道交通网络模型，以网络效率为测度，仿真研究了其鲁棒性。

基于复杂网络理论，构建了考虑站点客流加权的城市轨道交通网络模型，借助站点兴趣点(POI)数据计算日均客流量，并将其作为网络初始负载，以准确描述轨道交通运营网络并进行抗毁性仿真研究，根据仿真结果，为轨道交通路网提供级联失效方面的建议，解决站点失效时负载重分配的问题，从而提高网络的鲁棒性和应对突发事件的能力。

1　城市轨道交通复杂网络模型构建

1.1　建模方法

使用Space-L方法构建城市轨道交通网络模型。在Space-L方法中将交通网络中的站点表示为节点，同一线路上相邻站点之间的路段表示为连边。Space-L法构建的拓扑模型能最大限度地反映现实站点与线路的空间分布，具有高度的空间一致性与结构真实性。这种拓扑模型有利于分析网络结构的最基本特征和各路段的不同特征。同时，通过计算节点间的最短路径长度，可以量化任意站点至其他站点的途经站点数目，进而为该站点的网络可达性和拓扑中心性提供客观的评估依据。Space-L方法建模示意图如图1所示。

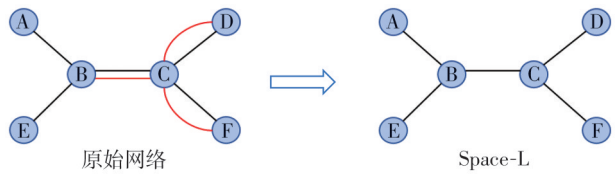


图1　Space-L方法建模示意图

Fig.1　Schematic diagram of Space-L modeling method

1.2　基于复杂网络的网络拓扑参数

（1）节点度。节点度是指与节点i相连的其他节点数目之和。它是衡量节点重要性的常用指标，通常节点度值越高，表明该节点在网络中的影响力越大。

$$d_i = \sum_{j \in N} A_{ij} \tag{1}$$

式中：N为网络的总节点数；A_{ij}为网络的邻接矩阵。

（2）节点介数。节点介数定义为网络中所有节点对的最短路径中经过该节点的路径数量占总最短

路径数的比例。该指标能够有效表征节点在网络中的中介性与控制能力，是评估其拓扑重要性的核心指标。

$$D_i = \sum_{j,\ k \in N(j \neq k)} \frac{b_{jk}(i)}{b_{jk}} \tag{2}$$

式中：$b_{jk}(i)$为节点j和k的最短路径中经过节点i的数目；b_{jk}为节点j与k的最短路径总数。

（3）集聚系数。集聚系数是衡量网络节点邻居间连接紧密程度的指标。它揭示了网络的局部集群化特征，反映网络是否具有小世界特性。

$$E_i = \frac{2C_i}{d_i(d_i - 1)} \tag{3}$$

式中：E_i为集聚系数；C_i为与节点i与d_i个邻居节点之间实际存在的边数。

（4）平均路径长度。平均路径长度定义为网络中所有节点对之间最短路径的算术平均值，它是表征网络全局连通性与传输效率的关键拓扑参数。

$$R = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,\ j \in N(i \neq j)} a_{ij} \tag{4}$$

式中：a_{ij}为节点之间距离的最大值，即网络直径。

（5）节点 PageRank 值。PageRank 算法的核心思想在于，网络中某一节点的重要性不仅取决于其邻居节点的数量，更依赖于邻居节点自身的重要性。

$$PR(i) = \frac{1-d}{N} + d\sum\left(\frac{PR(j)}{L(j)}\right) \tag{5}$$

式中：$PR(i)$为待计算节点i的 PageRank 值；$PR(j)$为节点i的所有邻居节点j的 PageRank 值；$L(j)$为节点j的邻居节点总数；d为阻尼系数，该值介于0和1之间，通常取0.85。

（6）模块度。模块度是一个用于量化网络社区结构强度的指标，衡量网络被划分为不同社区(或模块)的“好坏”程度，其核心思想是：在一个好的社区划分中，社区内部的连接应该非常紧密，而社区之间的连接应该相对稀疏。

$$Q = \frac{1}{2m}\sum_{i,\ j}\left(A_{ij} - \frac{d_i d_j}{2m}\right)\delta_{c_i c_j} \tag{6}$$

式中：Q为网络的模块度；m为网络总边数；c_i和c_j分别为节点i和j的社区；$\delta_{c_i c_j}$为指示函数，若节点i和j属于一个社区，即c_i=c_j，则该值为1，否则为0。

2　基于客流加权的节点负载-容量模型

2.1　建模说明

为便于系统分析城市轨道交通网络的拓扑特性及其抗毁性能，在构建基于客流加权的复杂网络模型之前，需明确以下基本假设与建模原则。

（1）模型结构：忽略轨道交通线路的运营方向性，将其抽象为一个无向拓扑网络。实际运营中，轨道交通区间普遍实行上下行双向通行机制，因此可将每一个站间区间视为一条无向边。

（2）网络元素定义：模型中以节点表示车站，边表示相邻车站之间相连的路段，换乘站作为线路交汇节点，其功能体现为连接多条线路的枢纽。

（3）负载分配机制与容量约束：在构建节点加权负载-容量模型时，需引入节点容量限制以模拟实际运营约束。当某一站点失效时，其所承载的客流负载将依据相邻节点的剩余容量按比例重新分配。客流量作为关键运营指标，在此模型中用以动态表征线路与站点的实际承载能力。

2.2　节点负载及容量

为更准确地描述实际运营条件下城市轨道交通网络的动态特性，采用各站点的日均客流量作为关键指标，以量化节点初始负载。

$$Q_i(0) = L_i \tag{7}$$

式中：$Q_i(0)$为节点i的初始负载；L_i是节点i的日均客流量。

节点容量定义为该节点在单位时间内所能处理的最大负载量，其值通常与节点的初始负载存在一定相关关系。在实际网络中，初始负载较小的节点一般有较大的剩余容量，故节点容量和负载之间并非简单的线性关系[11]。鉴于轨道交通网络客流量受多重因素影响，借鉴齐亚伟[12]等的模型，采用非线性函数对节点容量与初始负载之间的关系进行建模，以期更贴近实际运营的复杂特征。

$$B_i = Q_i(0) + \alpha Q_i(0)^{\beta} \tag{8}$$

式中：α和β为节点i的容量冗余参数，且0<α<1，0<β<1。

2.3　节点负载-容量模型

目前，节点状态通常以二元状态进行建模，即仅考虑正常与失效2种状态。然而在实际运营中，

当站点客流量达到其额定容量时，节点未必立刻出现完全性功能丧失，仍可继续接收部分客流。为更精确地刻画上述中间过渡状态，引入“过载状态”以扩展节点状态描述维度。相应的节点负载–容量模型表达式如下所示。

$$Q_i(t+1)=\begin{cases}0 & Q_i(t)\leqslant B_i\\ Q_i(t)-B_i & B_i<Q_i(t)<\mu B_i\\ Q_i(t) & \mu B_i\leqslant Q_i(t)\end{cases} \tag{9}$$

式中：$Q_i(t+1)$为节点i被攻击后下一时刻向邻居节点转移的负载量；$Q_i(t)$为节点i未被攻击时的负载；μ为过载系数($\mu\geqslant1$)，用于调节节点的负载容限，其值越大，节点的鲁棒性越强，越不易失效。

公式(9)表示：当$Q_i(t)\leqslant B_i$时，节点i的负载小于容量，节点处于正常状态，下一时刻不用向其邻居节点转移负载；当$B_i<Q_i(t)<\mu B_i$时，节点负载介于容量和过载容限之间，节点处于过载状态，下一时刻不再接受新的负载，且要向其邻居节点转移负载；当$\mu B_i\leqslant Q_i(t)$时，节点负载大于过载容限，节点处于失效状态，下一时刻无法再接受新的负载，且需向邻居节点转移全部负载。

3　基于客流加权的网络级联失效模型

3.1　复杂网络级联失效模型

结合节点日均客流量及节点容量，根据节点剩余容量负载分配策略对其负载进行重分配。该策略根据邻居节点的容量大小分配失效或者过载节点的转移客流量，即邻居节点的剩余负载容纳能力越大，则该节点接受到的失效或过载节点的转移客流量越多，以此负载分配机制实现网络抗毁性仿真。

当网络中的某些节点发生故障而失效或负载超出其节点容量时，该节点的负载会按照一定规则转移给其邻居节点。假设网络中节点i遭受攻击发生故障，则故障节点i下一时刻转移给其相邻节点j的负载分配比例与分配量如下。

$$p_{i\to j}(t+1)=\frac{Q_j(t)-B_j}{\sum\limits_{n\in\Gamma_i}(Q_n(t)-B_n)} \tag{10}$$

式中：$p_{i\to j}(t+1)$为下一时刻节点i向邻居节点j分配的负载比例；Γ_i为失效节点集合。

$$\Delta Q_{i\to j}(t+1)=Q_i(t)\times p_{i\to j}(t+1) \tag{11}$$

式中：$\Delta Q_{i\to j}(t+1)$为下一时刻节点i向节点j转移的负载量。

3.2　级联失效指标

为仿真研究轨道交通网络的抗毁性，以最大连通子图比例与网络效率作为量化指标，分析网络在级联过程中的动态行为与整体性能表现。最大连通子图作为复杂网络结构的主干，通常承载着网络主要的功能和流量，对维持网络整体连通性具有关键作用。网络效率是评估网络中任意两节点之间信息传输便捷程度的指标。作为衡量网络级联失效的2项关键指标，引入最大连通子图比例与网络效率，仿真分析轨道交通网络的抗毁性。

（1）最大连通子图比例。最大连通子图比例是衡量网络整体连通性的度量指标。当网络中某些节点遭受攻击或发生故障后，网络被分离为多个子图或孤立节点，其中包含节点数量最多的连通分量称为最大连通子图，其节点数量与网络初始节点总数之比称为最大连通子图比例。

$$S=\frac{N'}{N} \tag{12}$$

式中：N'为网络最大连通子图的节点总数。

（2）网络效率。网络效率是衡量网络中节点间信息传输整体有效性的度量指标，节点间最短路径越短，传输效率越高。

$$E=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i,\,j\in N(i\neq j)}\frac{1}{l_{ij}} \tag{13}$$

式中：l_{ij}为节点i与节点j之间的最短路径长度。

3.3　攻击策略

通常，网络攻击可分为节点攻击和边攻击2种策略，即通过选择性移除节点或边仿真模拟网络的抗毁性，这里侧重研究节点攻击。对城市轨道交通系统而言，引发站点出现故障的主要因素涉及人为因素、设施设备因素和自然因素。人为因素包括操作失误、管理薄弱等；设施设备因素包括车辆系统故障、轨道问题等；自然因素则常见有暴雨、地震等自然灾害。

使用静态和动态2种攻击策略，以最大连通子图比例和网络效率为测度，仿真研究网络的静态和动态抗毁性。

静态抗毁性仿真，是按照相应规则依次移除网络中的节点，观察最大连通子图比例和网络效率的

变化；静态攻击策略包括随机攻击、度值从大到小依次攻击、介数从大到小依次攻击和PageRank值从大到小依次攻击。动态抗毁性仿真，是指当节点遭受攻击后，重新计算网络指标，作为下一轮移除节点的依据，以此观察网络抗毁性指标的动态变化。动态攻击是在静态攻击的基础上实施的迭代式攻击过程，每一轮攻击结束后需根据预设规则对网络节点重新排序，并根据该序列执行下一轮攻击。动态攻击策略包括随机攻击、度值最大依次攻击、介数最大依次攻击、负载最大依次攻击。级联失效仿真流程如图2所示。

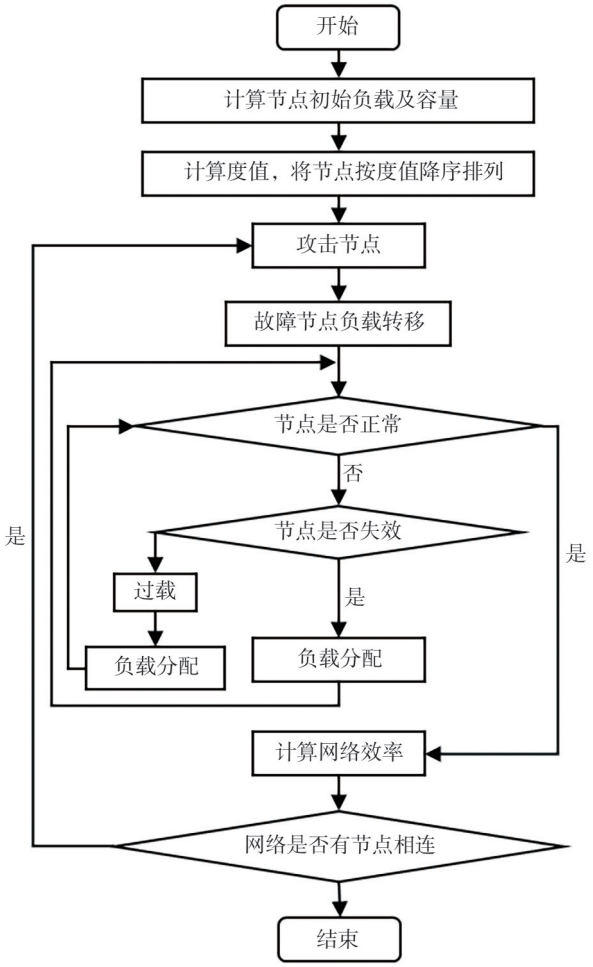


图2　级联失效仿真流程

Fig.2　Cascading failure simulation flowchart

4　实验仿真

4.1　背景及数据说明

为验证以客流量为初始负载的负载-容量模型，以苏州市轨道交通网络(截至2024年6月)为例，其轨道交通线网由6条线路、181个站点构成。受限于网络各站点的客流量数据无法直接获得，首先收集各站点所在线路的单线日均客流量，再借助Arcgis建立半径500 m的缓冲区，爬取各站点的POI数据，通过分类和计算相关系数，最终得到各站点的日均客流量。苏州市轨道交通网络及其缓冲区如图3所示。

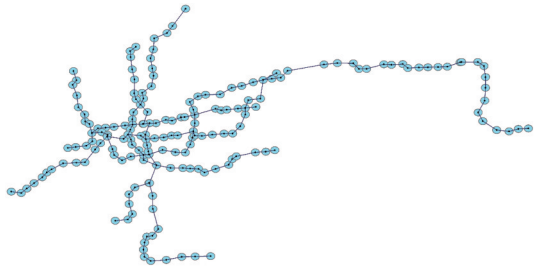


图3　苏州市轨道交通网络拓扑图及其缓冲区

Fig.3　Topology diagram of Suzhou rail transit network and its buffer zone

首先，借助苏州地铁官方微博公布的数据，采集苏州市轨道交通1，2，3，4，5，11号线2024年5月1日至2024年7月1日的单线客流量数据，分别取平滑系数为0.3，0.5和0.7，对所采集的数据进行指数平滑，对比不同平滑系数下的标准误差值，取标准误差值最小的平滑结果作为苏州市轨道交通1，2，3，4，5，11号线的单线日均客流量，得到苏州市轨道交通线路日均客流量如表1所示。接着，收集节点的POI数据，借助高德地图，以各站点为圆心建立半径为500 m的缓冲区，用Python爬取缓冲区内各类POI数据，根据其对客流量的影响程度，分为11类，参考相关文献[13-14]，得出各类POI与客流量之间的标准化系数如表2所示，最终计算出各站点的日均客流量，以此作为负载容量模型中节点的初始负载。

表1　苏州市轨道交通线路日均客流量　万人/d

Tab.1　Average daily passenger flow of Suzhou rail transit lines

线路	1	2	3	4	4支线	5	11
客流量	33.512	33.857	26.024	38.165	3.861	17.815	16.555

表2　各类POI与客流量之间的标准化系数

Tab.2　Standardization coefficients between various POI categories and passenger flow

POI	系数	POI	系数	POI	系数
公司/政府	0.097	餐饮	0.164	购物	0.122
科教文化	0.102	金融	0.112	丽人	0.109
休闲娱乐	0.091	住宿	0.089	医疗	0.061
交通设施	0.029	风景	0.024		

为验证POI与客流量相关系数的准确性，以西安地铁1号线2025年7月的客流数据进行验证，西安地铁1号线7月份的平均客流为60.7万人次(数据来源于西安地铁官方微博)，西安地铁1号线估算客流和实际客流量如表3所示。

表3　西安地铁1号线估算客流和实际客流量　万人次
Tab.3　Estimated and actual passenger flow of Xi'an Metro Line 1

站点	POI估算客流	实际客流	站点	POI估算客流	实际客流
沣河森林公园	0.604	0.59	玉祥门	3.364	3.17
北槐	0.728	0.71	洒金桥	4.052	4.27
上林路	1.975	1.91	北大街	5.720	5.94
沣东自贸园	0.354	0.31	五路口	7.317	7.42
后卫寨	3.132	3.66	朝阳门	3.408	3.21
三桥	1.870	1.62	康复路	3.535	3.78
皂河	2.743	2.51	通化门	5.285	5.09
枣园	1.412	1.32	万寿路	1.166	1.09
汉城路	1.579	2.23	长乐坡	1.271	0.99
开远门	1.803	1.66	浐河	0.874	0.79
劳动路	1.824	1.74	半坡	2.579	2.06
纺织城	3.506	4.03			

由表3可得出测算客流与实际客流的*MAE*=0.2，*RMSE*=0.267，*RMSE*/*MAE*=1.334，最大误差为0.651，出现在汉城路站，这是由于该站附近的各类POI数量较少，但是其承担着西咸新区与西安主城区的通勤衔接功能，因此其实际客流量较大；有9个站点误差小于0.1，6个站点误差在0.1~0.2之间，4个站点误差在0.2~0.3之间，4个站点误差大于等于0.3，西安地铁1号线的23个站点中有15个站点的误差控制在0.2以内，表现良好。

4.2　网络拓扑特征指标分析

经仿真计算得到苏州市轨道交通的网络拓扑参数表如表4所示。可以看出，网络平均度为2.099 4，说明每个节点的邻居节点平均有2个，网络中存在少量换乘站，但大部分站点仅位于单一线路上，网络整体连接性较为稀疏；平均度较低，意味着网络结构以树状或链状为主，而非高度互联的网格状；网络介数中心性为0.099 1，说明网络中存在少量但关键的枢纽节点，这些节点承担了大量客流中转功能，一旦发生故障可能会导致网络出现级联失效风险，这一结论有力验证了轨道交通网络“枢纽-辐射”的典型结构特征，其换乘站在网络中具有战略核心地位；集聚系数为0，表示苏州轨道交通网络换乘站少，网络结构呈链状或树状特性，不存在闭合的三角形结构，即任意2个邻居节点之间没有直接相连，因此，该网络不具备小世界特性，表现出较低的线网紧密度和换乘效率。网络的平均路径长为18.689 3，说明网络整体连通效率低，缺乏有效的捷径和枢纽节点，导致出行需要经过大量冗余的节点和路段，乘客的平均换乘次数多，轨道交通网络的可达性低；网络初始效率为0.095 8，说明部分线路和站点利用率低，存在运能浪费，乘客出行绕行比例高等现象，少数换乘站客流压力大，容易造成大客流拥堵；模块度为0.806 8，说明网络被分割为多个内部紧密、相互隔离的社区，不同区域间的连接不足，局部高效但网络整体低效。这些参数说明苏州市轨道交通网络可达性差，换乘依赖性强，冗余度低，网络规划偏向于树状辐射模式，尚未形成高密度的网格化网络，因此，网络鲁棒性较弱。在后续的规划中可以在关键区域建设联络线，形成局部三角或环形结构，提高集聚系数和网络冗余；在客流交汇处增设换乘站，降低平均路径长度，分散核心枢纽站点的压力；通过调整线路走向或增设支线，减少远程出行所需的换乘次数。

表4　网络拓扑参数表
Tab.4　Network topology parameters

拓扑参数	平均度	介数中心性	平均路径长度	集聚系数	初始效率	模块度
取值	2.099 4	0.099 1	18.689 3	0	0.095 8	0.806 8

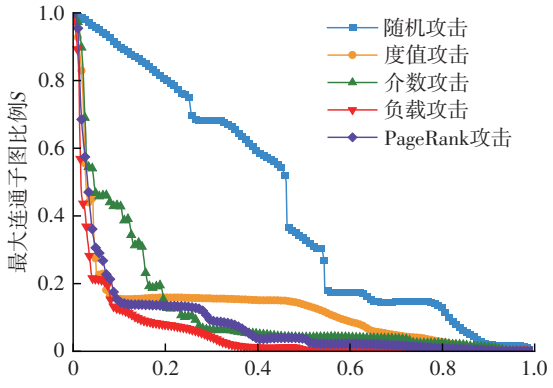
4.3　网络抗毁性仿真分析

在进行随机攻击时，通常遵循随机选择网络中某一节点实施攻击，直至网络彻底崩溃或所有节点均被遍历。为保证数据均衡性并降低随机偏差，本研究将重复该随机攻击过程20次，并最终以所获数据的算术平均值作为仿真实验结果。

4.3.1　静态抗毁性仿真

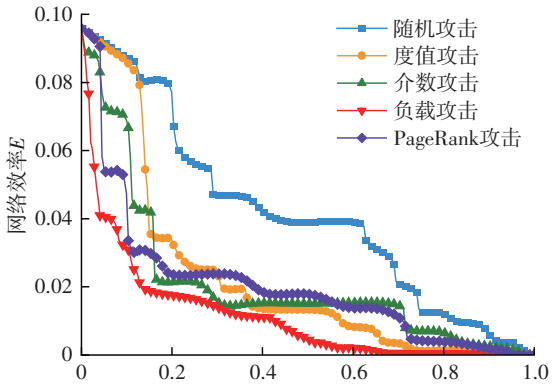
通过构建仿真模型，分别模拟随机攻击策略以及基于度值、介数和PageRank值的蓄意攻击策略，对苏州市轨道交通网络的静态抗毁性进行定量分析与评估。网络静态抗毁性仿真如图4所示。

由图4a可以看出，轨道交通网络的最大连通子图比例在遭受不同攻击时表现出明显的差异，随机攻击下网络的最大连通子图比例比其他攻击策略更高。当失效节点比例为0.2时，最大连通子图比例下降到了0.81，远高于度值攻击的0.16和介数攻



a　最大连通子图比例

a　Largest connected component ratio



b　网络效率

b　Network efficiency

图4　网络静态抗毁性仿真

Fig.4　Simulation of network's static invulnerability

击的0.14。而当失效节点比例为0.85时，三种蓄意攻击策略下的最大连通子图比例均降为0。从图4b来看，随机攻击下的网络效率下降比其他攻击策略下降更慢，当失效节点比例为0.2时，随机攻击的网络效率为7.9%，度值、介数和PageRank蓄意攻击的网络效率分别为3.4%，2.2%，2.9%，此时随机攻击的网络效率远高于3种蓄意攻击，当失效节点比例为0.7时，度值攻击的网络效率最先变为0。而随机攻击下网络的抗毁性较强，此时网络的连通率和网络效率下降都较缓慢。当使用蓄意攻击策略时，网络的抗毁性明显减弱，从最大连通子图比例来看，度值和PageRank攻击在失效节点比例为0.1时，最大连通子图比例已经从1下降到0.2以下，而介数攻击在失效节点比例为0.3时，网络的最大连通子图比例已经趋于0。

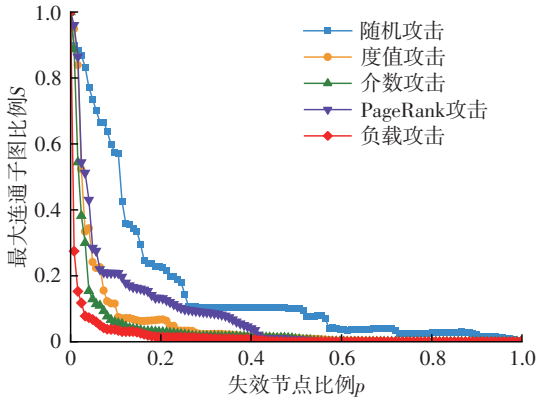
由上述分析可知，苏州市轨道交通网络在面临随机攻击时表现出较强的抗毁性，而在遭受基于拓扑指标的蓄意攻击时则表现出脆弱性。这一现象归因于该网络规模有限且具有无标度特性，导致其关键节点在受到攻击后易引发大规模失效，使网络分散为多个孤立子图或离散节点，进而造成网络传输效率与全局连通性显著下降。因此，蓄意攻击对轨道交通网络的静态抗毁性影响尤为显著。

4.3.2　动态抗毁性仿真

与静态攻击相比，动态攻击能更快摧毁网络，使网络在短时间内失效。根据上述蓄意攻击策略，鉴于苏州火车站这一地铁站点的日均客流量较高，因此，根据仿真流程图对其进行分析，采用该节点日最高聚集人数修正节点容量，修正后得出节点容量与初始负载的比值约为1.2，若需要满足因邻居节点失效导致的客流量转移，该值应该处于1.2~1.6。此时容量冗余系数α的合理取值范围为0.5~0.9，β的合理取值范围为0.4~0.9[15]。因此，此处取α=0.8，β=0.5，过载系数μ=1.2，采用不同攻击策略对网络进行级联失效仿真分析。网络动态抗毁性如图5所示。

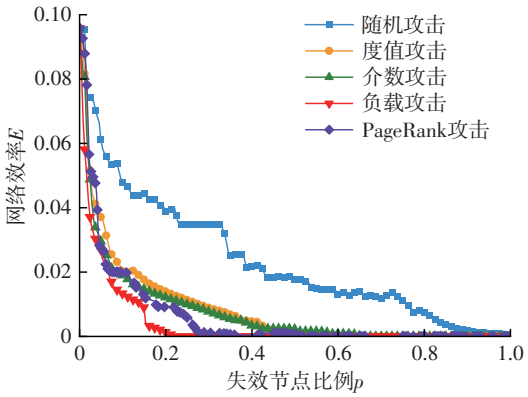
由图5可知，在随机攻击模式下，最大连通子图比例与网络效率均呈现较为平缓的衰减趋势。当节点失效比例分别达到0.9和0.96时，网络完全崩溃，2项指标均下降至0。

蓄意攻击时，当节点失效比例小于0.1时，3种攻击方式下网络最大连通子图迅速下降，其中负载攻击影响最大，其次为介数攻击和度值攻击。当节点失效比例为0.4时，3种蓄意攻击下的最大连通子图基本降为0，说明当失效节点达到一定规模时，网络中已不存在连通子图。由图5a可知，相比度值攻击，介数攻击能更快找到网络的关键节点使其失效，这是由于在苏州市轨道交通网络中，介数高的站点是连接不同区域的关键枢纽，控制着大量客流的最短路径。移除这类节点会强制客流绕行，显著增加其他站点的负载，容易触发级联失效。当节点失效比例为0.2时，介数攻击和度值攻击对应的最大连通子图比例分别下降到0.03和0.07。由图5b可以看出，负载攻击下网络的全局效率下降最快，当失效节点比例为0.2时，负载攻击的网络效率已基本降为0，此时度值攻击和介数攻击对应的网络



a　最大连通子图比例

a　Largest connected component ratio



b　网络效率

b　Network efficiency

图5　网络动态抗毁性

Fig.5　Network's dynamic invulnerability

效率分别为1.4%和1.2%。当失效节点比例为0.4时，度值攻击和介数攻击对应的网络效率基本保持一致但还未降为0，当失效节点比例为0.6时，度值攻击和介数攻击的网络效率基本降为0。度值和介数作为衡量网络的重要指标，其值越大，说明节点在网络中的位置越重要，因此在度值攻击和介数攻击的初始阶段，受攻击节点为网络的关键节点，这些节点失效会迅速破坏网络结构。此外，网络面对负载攻击时最脆弱，也就是说，客流量大的节点在网络中发挥重要作用，一旦遭受攻击将会导致大批量节点失效，从而引发大规模级联失效。总体而言，苏州市轨道交通网络面对随机攻击时抗毁性较强。面对蓄意攻击时，网络最大连通子图比例和全局效率快速下降，整体表现出明显的脆弱性，说明选择性攻击对网络影响更大。

对比图4和图5可以看出动态攻击下无论是随机攻击还是基于网络拓扑指标的蓄意攻击，网络的最大连通子图比例和网络效率均下降更快，说明动态攻击能更快摧毁网络，此时网络更为脆弱。

4.3.3　显著性检验

为检验不同攻击策略对轨道交通网络抗毁性影响的统计学差异，采用重复实验设计与严格的统计推断流程。首先，每种攻击策略均在10%攻击比例下独立进行30次重复仿真，以控制随机误差。在此基础上，采用单因素方差分析(ANOVA)检验5种攻击策略对网络最大连通子图比例的整体影响。当方差分析显示显著差异后，进一步使用诚实显著差异方法(Tukey HSD)进行事后多重比较，在控制整体第一类错误率(α=0.05)的前提下，对所有策略对进行两两比较，并计算95%置信区间。所有统计分析均通过Python的statsmodels库实现。Tukey HSD多重比较检验结果如表5所示。

表5　Tukey HSD多重比较检验结果

Tab.5　Results of Tukey HSD multiple comparisons

攻击策略A	攻击策略B	均值差异	95%置信空间	p值	显著性
随机攻击	度值攻击	0.323	(0.289，0.357)	<0.001	***
随机攻击	介数攻击	0.342	(0.308，0.376)	<0.001	***
随机攻击	PageRank攻击	0.193	(0.159，0.227)	<0.001	***
随机攻击	负载攻击	0.535	(0.501，0.569)	<0.001	***
度值攻击	介数攻击	0.020	(−0.014，0.054)	0.494	ns
度值攻击	PageRank攻击	−0.129	(−0.163，−0.095)	0.031	*
度值攻击	负载攻击	0.212	(0.178，0.246)	<0.001	***
介数攻击	PageRank攻击	−0.148	(−0.182，−0.114)	0.002	*
介数攻击	负载攻击	0.193	(0.159，0.227)	0.001	**
PageRank攻击	负载攻击	0.342	(0.308，0.376)	<0.001	***

注：***表示p<0.001，**表示p<0.01，*表示p<0.05，ns表示$p\geq$0.05；均值差异表示攻击策略A和攻击策略B下最大连通子图比例均值的差值，该值为正，表示A策略的最大连通子图比例高于B策略，即攻击策略B的破坏力更强。

方差分析结果显示，5种攻击策略对网络最大连通子图比例的影响存在极显著差异($F(4, 145)=187.25$，p<0.001)。

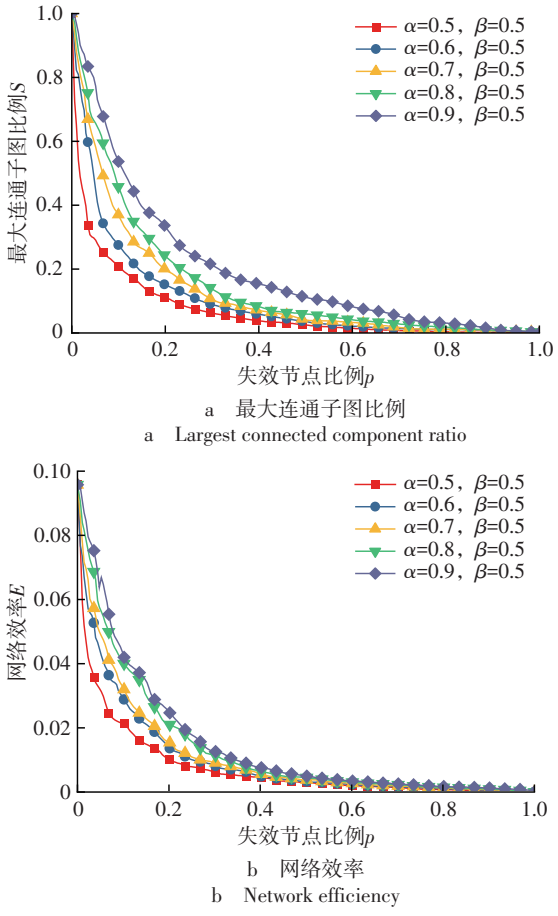
显著性检验的比较结果显示，随机攻击的破坏效果显著弱于所有蓄意攻击策略(p<0.001)。在蓄意攻击策略中，负载攻击的破坏力最强，与所有其他策略均存在显著差异。值得注意的是，度值攻击与介数攻击的差异未达到统计显著性(p=0.494)，表明基于度值和介数中心性的攻击效果相近。PageRank

攻击的破坏效果介于随机攻击和度值/介数攻击之间。

4.4　节点容量系数对网络抗毁性的影响分析

由于城市轨道交通网络的客流量是动态变化的，节点客流量又直接决定节点初始负载，进一步决定节点容量，不同的负载和容量会对网络的抗毁性能产生不一样的影响。α和β作为影响节点容量的2个参数。首先固定β，分析不同α值对网络抗毁性的影响，得到系数α对网络抗毁性的影响如图6所示。由图6可知，当β=0.5，过载系数μ=1.2时，随着α的逐步增大，网络的最大连通子图比例和网络效率均呈下降趋势。α越大，下降趋势越平缓，网络的抗毁性能越好，说明增大节点容量可以提高网络抗毁性。但当α大于0.9时，网络效率将不再变化，故当β=0.5时，α的最优值为0.9。

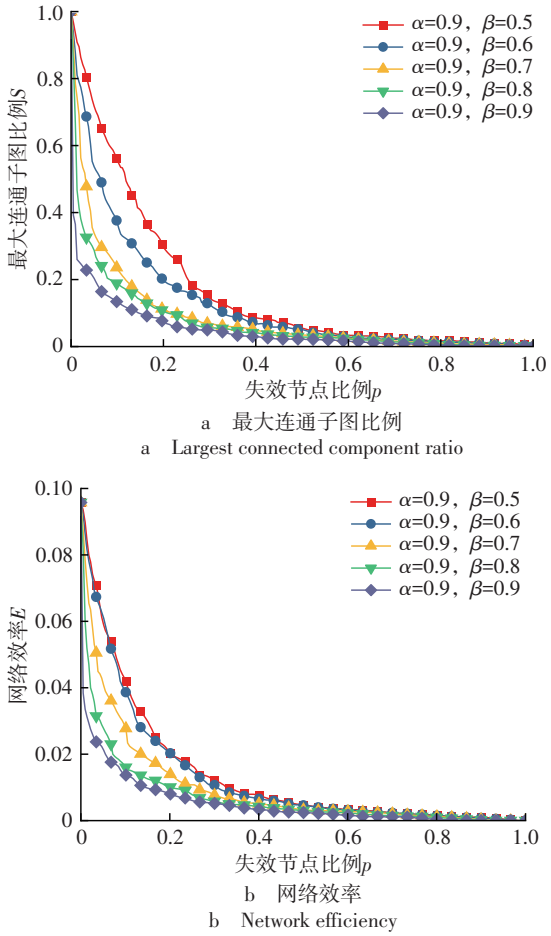
再分析β变化对网络抗毁性的影响，由图6可知，最佳容量系数α=0.9，故固定α为0.9，得到系数β对网络抗毁性的影响如图7所示。由图7可见，当过载系数μ=1.2时，随着系数β的逐步增大，网络最大连通子图比例和全局效率均呈下降趋势。随着β的增大，最大连通子图比例S和网络效率E衰减得更快，尤其β=0.9时，网络衰减最快，即β越大，网络抗毁性越差。由上述分析可得最佳容量系数为α=0.9，β=0.5。



a　最大连通子图比例
a　Largest connected component ratio

b　网络效率
b　Network efficiency

图6　系数α对网络抗毁性的影响
Fig.6　Effect of coefficient α on network invulnerability



a　最大连通子图比例
a　Largest connected component ratio

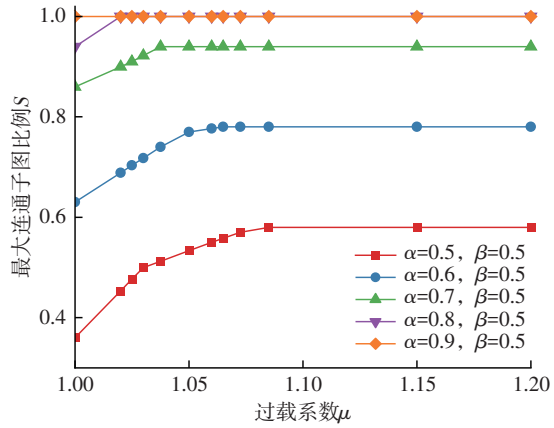
b　网络效率
b　Network efficiency

图7　系数β对网络抗毁性的影响
Fig.7　Effect of coefficient β on network invulnerability

4.5　过载系数对网络抗毁性的影响分析

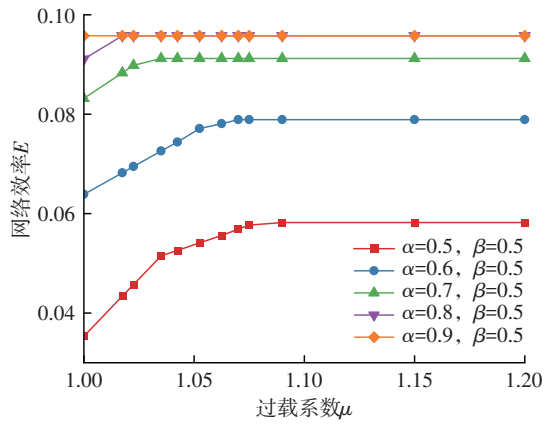
仿真分析过载系数μ对网络抗毁性的影响如图8所示。由上述分析可知，最大连通子图比例和网络效率随失效节点比例增加均呈下降趋势，且前期的下降速度明显大于后期，由于“过载”节点下一时刻无法接受负载，但仍然会降低网络整体的运行效率，所以适当增大过载系数，网络的抗毁性会增强。通过图8可知，当过载系数增大到一定程度时，网络的抗毁性指标不再改变。此时通过增加容

量系数α可以显著增强网络的抗毁性，且α越大，网络抗毁性能越好。



a　最大连通子图比例

a　Largest connected component ratio



b　网络效率

b　Network efficiency

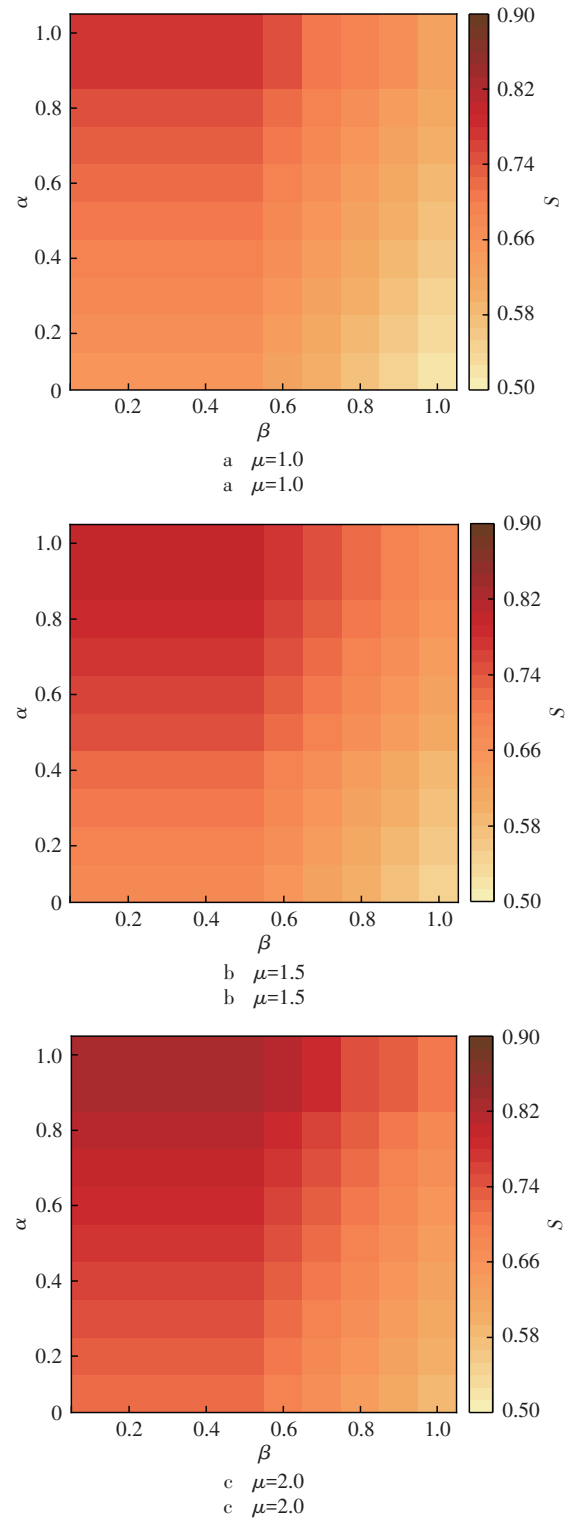
图8　系数μ对网络抗毁性的影响

Fig.8　Effect of coefficient μ on network invulnerability

4.6　系数对抗毁性指标的影响

为明确容量冗余系数α，β和过载参数μ对网络抗毁性指标的影响，绘制系数–最大连通子图比例热力图如图9所示。从图9可以看出，随着μ增大，相同容量参数下的最大连通子图比例增大，说明增大过载系数，网络的抗毁性增强。无论过载系数为何值，容量参数α>0.9，β<0.5时最大连通子图不再变化，说明容量参数达到一定阈值后，节点容量的变化将不会影响网络抗毁性。

同理绘制了系数–网络效率热力图如图10所示。从图10可以看出，随着μ增大，相同容量参数下网络效率增大，说明增大过载系数，网络的抗毁性增强。当容量参数α>0.9，β<0.5时，不同过载系数下的网络效率均不再变化，说明容量参数达到一定阈值后，其值变化将不会影响网络抗毁性。



a　μ=1.0

a　μ=1.0

b　μ=1.5

b　μ=1.5

c　μ=2.0

c　μ=2.0

图9　系数–最大连通子图比例热力图

Fig.9　Heatmap of coefficient and largest connected component

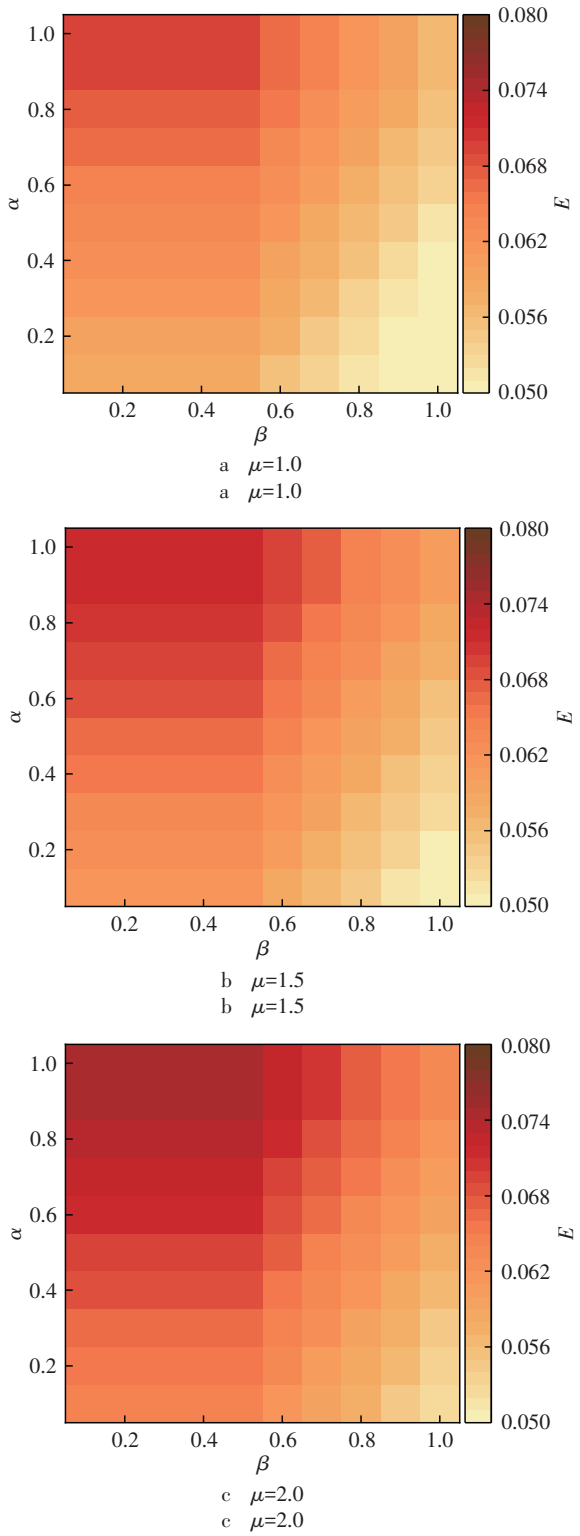


图10　系数-网络效率热力图

Fig.10　Heatmap of coefficient and network efficiency

5　结论

基于复杂网络理论，利用Space-L方法构建了城市轨道交通网络拓扑结构，然后结合非线性负载容量模型，构建了基于客流加权的轨道交通级联失效模型，以苏州市轨道交通网络为例，实证分析了网络的特征指标及其复杂网络特性，定量研究了苏州市轨道交通网络在随机攻击和蓄意攻击下的抗毁性，得出以下结论。

（1）苏州市轨道交通网络紧密度较低，不存在小世界特性，网络表现出一定的脆弱性。在未来线网规划中应该加强各线路之间的联系，提高换乘效率。对苏州火车站、乐桥站等大客流站点应重点防护，适当对换乘站和大客流站点进行改扩建，能有效提升网络的抗毁性能。

（2）与随机攻击相比，苏州市轨道交通网络面对蓄意攻击的抗毁性更差；基于度值、介数、PageRank值以及负载的4种蓄意攻击策略对网络的最大连通子图比例和全局效率影响更大。就动态抗毁性而言，网络在遭受负载攻击时更容易崩溃，即大客流量节点遭受攻击对网络的影响更大。因此，需要加强对大客流站点的保护，以保障网络的安全稳定运营。

（3）节点容量参数α和β的改变对网络抗毁性有一定的影响。对苏州市轨道交通网络而言，当α取0.9，β取0.5时，网络在遭受攻击时的最大连通子图比例S和网络效率E两项抗毁性指标达到最优状态，此时再增大α或者减小β，网络的抗毁性指标都不再变化，即适当增大节点容量可以增强网络抗毁性。

参考文献：

[1] 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.

[2] 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(7)：250-258.
YANG Jingfeng, ZHU Dapeng, ZHAO Ruilin. Analysis on Characteristics of Urban Rail Transit Network and Robustness of Cascading Failure[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(7): 250-258.

[3] 刘朝阳，吕永波，刘步实，等. 城市轨道交通运输网络级

联失效抗毁性研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2018，18(5)：82-87.
LIU Zhaoyang，LYU Yongbo，LIU Bushi，et al. Cascading Failure Resistance of Urban Rail Transit Network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2018，18(5)：82-87.

[4] 吴　姗，韩晓龙，刘婵娟，等. 基于复杂网络的全球海运网络脆弱性分析[J]. 计算机工程与应用，2018，54(15)：249-254.
WU Shan，HAN Xiaolong，LIU Chanjuan，et al. Vulnerability Analysis of Global Container Shipping Network Based on Complex Network[J]. Computer Engineering and Applications，2018，54(15)：249-254.

[5] 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.

[6] SUN G X. Robustness Analysis of an Urban Public Traffic Network Based on a Multi-Subnet Composite Complex Network Model[J]. Entropy，2023，25(10)：1377.

[7] 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.
HAN Zijin，QIAN Mingjun，WANG Xixian，et al. Simulation of Cascade Failure in Urban Rail Transit Hypernetworks Based on Hypergraph Theory[J]. Journal of System Simulation，2024，36(12)：2960-2970.

[8] HONG S，WANG B Q，MA X M，et al. Failure Cascade in Interdependent Network with Traffic Loads[J]. Journal of Physics A：Mathematical and Theoretical，2015，48(48)：485101.

[9] SUN R R，ZHU G Y，LIU B，et al. Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Network Considering Cascading Failure Evolution[J]. Journal of Advanced Transportation，2022(1)：2069112.

[10] 杜　斐，黄宏伟，张东明，等. 上海轨道交通网络的复杂网络特性及鲁棒性研究[J]. 武汉大学学报(工学版)，2016，49(5)：701-707.
DU Fei，HUANG Hongwei，ZHANG Dongming，et al. Analysis of Characteristics of Complex Network and Robustness in Shanghai Metro Network[J]. Engineering Journal of Wuhan University，2016，49(5)：701-707.

[11] 王学光，张爱新，窦炳琳. 复杂网络上的非线性负载容量模型[J]. 计算机科学，2021，48(6)：282-287.
WANG Xueguang，ZHANG Aixin，DOU Binglin. Non-Linear Load Capacity Model of Complex Networks[J]. Computer Science，2021，48(6)：282-287.

[12] 齐亚伟，卢思凡. 我国铁路货运网络的级联失效抗毁性研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(7)：182-190.
QI Yawei，LU Sifan. Research on Cascade Failure Invulnerability in China's Railway Freight Networks[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(7)：182-190.

[13] 张　妍. 基于POI数据的地铁站点周边服务设施与城市功能特征研究：以苏州地铁1号线为例[J]. 建筑与文化，2022(11)：128-130.
ZHANG Yan. Study on Service Facilities around Subway Stations and Urban Functional Characteristics Based on POI Data：A Case Study of Suzhou Metro Line 1[J]. Architecture & Culture，2022(11)：128-130.

[14] 施念邡，李奕璇，胡洛铭，等. 地铁站周边商业设施数量类型与客流关系研究：以北京地铁4号线-大兴线为例[C]//2019中国城市规划年会论文集. 重庆，2019：65-76.

[15] 林兆丰. 城市公交-地铁双层网络抗毁性研究[D]. 济南：山东建筑大学，2023.

[16] 关高峰，贾文博，孙东颖. 基于多层复杂网络的亚欧公铁海联运韧性研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(4)：150-161.
GUAN Gaofeng，JIA Wenbo，SUN Dongying. Research on Resilience of Asia-Europe Road-Rail-Sea Multimodal Transport Based on Multilayer Complex Networks[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：150-161.

(责任编辑　刘宁馨)