文章编号:1673-0291(2026)01-0083-12 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20240144

城市常规公交与地铁复合网络构建及鲁棒性分析

王连震[1],张国立[2],刘克毅[1],王宝杰[3]
(1.东北林业大学 土木与交通学院,哈尔滨 150040;2.济南城建集团,济南 250031;3.长安大学 运输工程学院,西安 710064)

摘 要:针对城市常规公交与地铁网络孤立分析无法捕捉乘客实际换乘行为和网络间耦合效应的问题,采用Space L建模方法构建常规公交与地铁加权复合网络模型.模型综合考虑节点间实际空间距离,利用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和高德地图接口(Application Programming Interface, API)将耦合半径设定为660 m,并剔除直线距离符合但实际路径过长的站点,将线路载运能力和乘客出行时间作为连边权重,充分兼顾网络供给能力与乘客出行成本.通过Matlab和Gephi软件分析网络拓扑特性,选取平均度、平均路径长度、聚类系数、介数等核心指标,并提出两种新型攻击策略:基于多属性决策理论、紧密及介数中心性的节点中心重要度攻击策略(Centrality Importance Attack Strategy, CIAS);考虑耦合节点替代效应的度攻击策略(Degree Attack Strategy of Coupling Nodes, DASCN),引入攻击效率评价函数,结合全局效率、最大连通子图相对大小和网络连通率等指标,以哈尔滨市主城区为案例,对比分析传统攻击策略与新型攻击策略的效果.研究结果表明:复合网络在平均度、平均聚类系数、网络效率和连通率等指标上均有显著提升,而平均路径长度和平均介数呈现下降趋势,表明复合网络具有更强的抗扰性;在相同移除规模下,节点中心重要度攻击对网络性能的负面影响大于其他传统策略;考虑耦合节点的度攻击对全局效率、最大连通子图与连通率的影响较小.

关键词:综合交通;交通网络韧性;公共交通系统;加权复合网络;鲁棒性;拓扑特性
中图分类号:U491 **文献标志码**:A

Construction and robustness analysis of urban conventional bus and subway composite networks

WANG lianzhen[1], *ZHANG Guoli*[2], *LIU Keyi*[1], *WANG Baojie*[3]
(1.School of Civil and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2.Jinan Urban Construction Group, Jinan 250031, China; 3.School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To address the problem that isolated analysis of conventional bus and subway networks fails to capture actual passenger transfer behaviors and inter-network coupling effects, this study constructs a weighted composite network model of conventional bus and subway systems using the Space L modeling method. The model integrates actual spatial distances between nodes, establishing a coupling

收稿日期:2024-12-10;**修回日期**:2025-09-18
基金项目:黑龙江省自然科学基金(PL2024E013);中央高校基本科研业务费专项资金(300102344501-1-1, 2572023CT21-03)
Foundation items: Heilongjiang Provincial Natural Science Foundation (PL2024E013); Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102344501-1-1, 572023CT21-03)
第一作者:王连震(1985—),男,山东禹城人,副教授,博士,博士生导师.研究方向为交通运输规划与管理. **email**: rock510@163.com.

引用格式:王连震,张国立,刘克毅,等.城市常规公交与地铁复合网络构建及鲁棒性分析[J].北京交通大学学报,2026,50(1):83-94.
WANG lianzhen, ZHANG Guoli, LIU Keyi, et al. Construction and robustness analysis of urban conventional bus and subway composite networks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(1): 83-94. (in Chinese)

radius of 660 m via Geographic Information Systems (GIS) and the Amap Application Programming Interface (API), while excluding stations where the actual walking path is excessive despite meeting straight-line distance criteria. Line carrying capacity and passenger travel time are assigned as edge weights to balance network supply capacity with passenger travel costs. Network topological properties are analyzed using Matlab and Gephi, focusing on core metrics such as average degree, average path length, clustering coefficient, and betweenness centrality. Furthermore, two novel attack strategies are proposed: the Node Centrality Importance Attack Strategy (CIAS), based on multi-attribute decision theory, closeness centrality, and betweenness centrality; and the Degree Attack Strategy of Coupling Nodes (DASCN), which accounts for the substitution effects of coupling nodes. An attack efficiency evaluation function is introduced to compare these novel strategies against traditional ones, using Harbin's main urban area as a case study. Performance is evaluated via global efficiency, the relative size of the largest connected subgraph, and the network connectivity rate. The results demonstrate that the composite network shows significant improvements in average degree, clustering coefficient, network efficiency, and connectivity rate, with decreased average path length and betweenness centrality, indicating enhanced resilience. Under identical node removal scales, the CIAS exerts a greater negative impact on network performance than traditional strategies, whereas the DASOCN has a comparatively smaller impact on global efficiency, the largest connected subgraph, and connectivity rates.

Keywords: comprehensive transportation; transportation network resilience; public transport system; weighted composite network; robustness; topological characteristics

现代城市的高效运转在很大程度上依赖于一个稳定、可靠的公共交通网络.其中,常规公交与地铁系统共同构成了城市交通的骨架,二者并非孤立运行,而是通过站点间的换乘功能紧密耦合,形成一个相互依存的复合网络系统.这种互联互通在提升出行效率的同时,也引入了新的脆弱性,局部设施的故障或失效(如地铁站因故关闭)可能通过网络间的耦合关系迅速传导、放大,引发大范围的交通瘫痪,即所谓的"级联失效"现象.因此,相比于单独研究公交或地铁网络,对复合网络进行系统性分析,更能反映乘客的实际出行模式(换乘)和系统整体功能,对于评估并提升城市交通韧性至关重要.

随着对复杂网络研究的深入,众多国内外学者应用复杂网络理论对交通网络的拓扑特性和静态鲁棒性进行了研究.早期研究多关注单一网络的拓扑特征,例如,文献[1]运用复杂网络理论中的建模与分析方法,通过横向比较3个代表性城市,揭示了不同城市轨道交通网络具有高度相似性.文献[2]运用复杂网络和统计物理学的理论与方法,首次对英国的公共运输网络进行了系统性的稳定性比较和结构功能分析,发现各个城市的最短路径长度都较小.文献[3]针对真实公交网络的方向性,改进了传统的复杂网络建模方法,建立了有向L/P空间模型,指出加权网络的平均路径长度分布服从高斯分布.

随着城市交通一体化的推进,研究重点逐渐转向多模式复合网络.构建方法各有不同,部分学者采用原始映射的方法构建单层网络,例如,文献[4]采用原始映射法构建了城市多模式交通网络模型,分析表明,多模式整合能有效增强网络的小世界特性和对随机故障的抵抗力.文献[5]运用复杂网络理论中的Space L/P方法,构建并分析了多模式复合交通网络,论证了加强公交与地铁的协同与衔接是提升整个公共交通系统效能的基础.另一些学者则构建了更为复杂的模型,文献[6]采用系统性主题分类与关键议题提取的方法,所研究的复合网络由公交网络、地铁网络、骑行网络和步行网络组成,提出了该领域理想的、循环向前的发展范式.文献[7]突破了将地铁网络视为单一层面网络的局限,通过融合Space L模型与智能卡大数据,构建了"线路-客流"双层网络模型,实现了从复杂网络理论到交通管理与城市规划实践的衔接.

在连边权重设计方面,为了更真实地反映网络特性,研究逐渐从无权网络转向加权网络.其中,客流量是衡量连接强度的重要指标.例如,文献[8]利用实际数据构建了包含列车运营流和乘客出行流的双层复杂网络模型,能够有效区分和解释系统中不同性质流动的时空模式差异及其相互作用机制,深化了对地铁网络结构与功能动态耦合关系的理解;文献[9]研究构建了一套从加权拓扑建模、多指标节点评估、网络等级划分,到基于演化理论的网络结构

优化的完整方法论体系,证明了将客流量作为核心权重,结合重力模型和节点等级偏好来驱动网络演化与优化的可行性与有效性.然而,仅依赖单一指标可能无法全面反映网络的复杂互动.

在鲁棒性与脆弱性评价方面,学者通过模拟节点或边在不同场景下的失效来评估网络的抗毁性.文献[10]将时间维度和多维失效后果引入公交网络鲁棒性评估,这突破了传统静态或日均分析的局限,为实施更精细、更智能的弹性公交网络规划与运营管理提供了重要的科学依据.文献[11]通过构建无向加权的公交-地铁复杂双层网络、量化脆弱性算子和模拟级联失效,定量计算了公交与地铁复合网络节点的脆弱性,揭示了暴雨扰动下公交-地铁系统的失效机理.文献[12]构建和分析不同耦合程度的公交-地铁双层网络,发现耦合半径与网络的抗毁能力呈正相关.文献[13]构建了一个融合了实际道路速度容量、随机用户均衡客流分配和复杂网络理论的综合性脆弱性分析模型,应用该模型发现,高拥堵状态和针对最大强度站点的攻击是公交网络最致命的弱点.文献[14]基于复杂网络理论,将地铁和公交的实际运营特性考虑在内,构建了加权复合网络,提出了“出行成功率”与“绕行系数”两个新的网络鲁棒性评价指标及两种新型攻击策略,并与传统攻击策略进行对比.文献[15]采用复杂网络理论中的Space-M方法,提出了考虑寒区城市居民出行特征的双层网络层间连边规则,发现相同意愿下严寒城市其他季节地铁与公交网络的鲁棒性要高于冬季.

国内外学者在网络拓扑特性与静态鲁棒性研究中成果显著,但存在固定耦合半径未考虑路网迂回效应、连边权重依赖单一指标、未区分节点功能替代性等不足.本文采用Space L方法建模,以实际步行距离确定耦合节点,构建常规公交与地铁加权复合网络,通过全局效率最大连通子图相对大小和网络连通率等指标分析鲁棒性,引入攻击效率函数,提出两类针对性失效策略检验网络性能,以哈尔滨市为例验证可行性,为公共交通系统研究与空间结构优化提供理论参考.

1　加权复合网络模型构建方法

1.1　子网络与复合网络构建

城市常规公交与地铁具有固定站点和固定线路,使用不同模型可将站点和线路抽象为网络的节点和连边.3种常见网络建模方法Space L、Space P和Space R构建出的网络在结果、侧重点上均有所不同:Space L强调站点的相邻关系,能够反映出乘客在站序上的实际出行路径;Space P将同一线路上的任意两站视为直接相连,适用于研究线路内部的整体连通性;Space R以线路为节点,通过共用站点建立连边,适用于表现线路层面的换乘结构.由于居民出行前及出行过程中更多地考虑的是出行距离,所以本文以居民乘坐距离问题为切入点,基于Space L方法构建常规公交子网络和地铁子网络,共包含5个步骤.

步骤1:创建无向非加权子网络模型.对研究范围内的常规公交和地铁站点、线路进行提取,并进行编号,建立基于Space L模型的公交子网络 $N_B=(V^B,E^B)$ 和地铁子网络 $N_S=(V^S,E^S)$,其中 V^B、V^S 分别为公交站点集合和地铁站点集合,E^B、E^S 分别为公交线路和地铁线路集合.

步骤2:进行网络映射.将公交子网络 $N_B=(V^B,E^B)$ 和地铁子网络 $N_S=(V^S,E^S)$ 一并映射至复合网络中形成子网合集,对映射到复合网络中的两子网全部站点进行重新编号,形成复合网络 $N_C=(V^C,E^C)$.

步骤3:耦合站点确定,如图1所示.

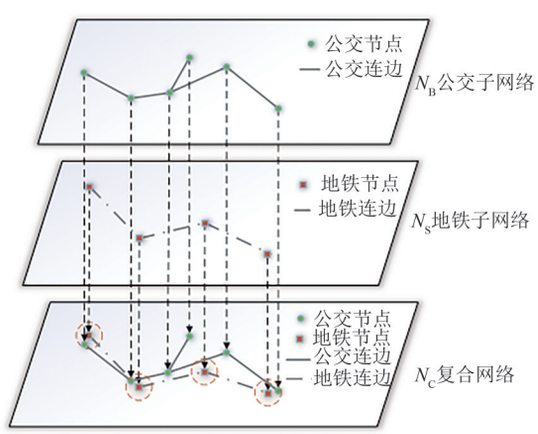


图1　复合网络示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the composite network

调用高德接口,计算地铁站点与缓冲区范围内每个公交站点的实际步行距离,并剔除实际步行距离大于缓冲区半径的公交站点,如图2所示.研究中采用的660 m实际步行距离阈值,是基于换乘时间阈值(8~12 min)与平均步行速度(1.2 m/s)折算得出,并通过高德地图接口获取道路网络的实际路径距离[16-19].获取方法为:对地铁站点生成660 m缓冲区后,仅保留缓冲区范围内实际步行路径距离≤660 m的公交站点作为耦合节点,排除直线距离符合但实际路径超限的站点,如图2所示.此方法充分考虑了城市路网形态、地形起伏及站点出入口分布对换乘距离的影响.

步骤4:连边赋权方法.将常规公交网络与地铁

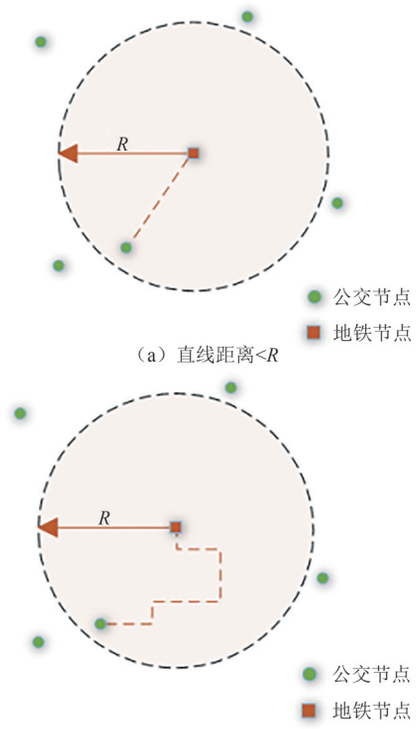


图2　耦合节点筛选示意

Fig. 2　Schematic diagram of coupling node selection

网络进行复合必须考虑不同交通方式、不同线路之间的差异性，通过网络对不同类型的连边进行赋权，尽量保持常规公交和地铁原有的特征，使其在复合网络中有所区分．采用同方式连边权重和换乘边连边权重两种加权复合网络连边方法，选取线路运营时间、发车间隔、车载容量、运行速度、站点间距等因素进行加权，权重越高表示两节点之间联系越紧密．

第1种：同方式连边权重．同方式连边权重为连边载运能力与出行时间的比值，此权重在本质上衡量的是单位时间内，一条线路（或多条共线线路）在两个站点间能够提供的“潜在客运服务量”．同方式连边权重计算方法为

$$w_{C,ij}=\sum_{b=1,s=1}^{\alpha,\beta}\left(\frac{60v_b}{h_{b,ij}d_{b,ij}}c_b o_b+\frac{60v_s}{h_{s,ij}d_{s,ij}}c_s o_s\right) \tag{1}$$

式中：$w_{C,ij}$为复合网络节点i,j之间同方式连边权重，人次/h；α、β分别为公交、地铁线路条数；$h_{b,ij}$、$h_{s,ij}$分别为第b条公交、第s条地铁线路节点i,j间的发车间隔，min；c_b、c_s分别为第b条公交、第s条地铁线路的满载客量，人；o_b、o_s分别为第b条公交、第s条地铁线路的运营时间，h；$d_{b,ij}$、$d_{s,ij}$分别为第b条公交、第s条地铁线路在节点i,j间的实际距离，km；v_b、v_s分别为第b条公交、第s条地铁运行速度，km/h．

这种通过构建具有明确物理意义的复合指标的方式，解决了将供给能力和乘客成本等不同量纲信息进行融合的问题，避免了通过主观赋权进行加权求和，使权重更具客观性和可比性．

第2种：换乘边连边权重．常规公交和地铁的换乘距离较短，乘客采取步行、共享单车的方式进行换乘，不受交通拥堵影响，但受换乘路径的长度、地形和路况等因素的影响．本文仅考虑换乘距离，换乘边连边权重计算方法为

$$w_{H,ij}=\frac{d_{ij}}{v_r} \tag{2}$$

式中：$w_{H,ij}$为换乘边连边权重；v_r为步行速度．

换乘边权重仅采用换乘距离的设定基于3方面理论依据：距离具有主导性，文献[18]表明步行换乘选择中距离解释力占比超70%；指标具备兼容性，通过高德API路径规划获取的实际路径距离含地形起伏、道路迂回等空间阻碍因素，可间接反映时间成本；数据具有可获性，文献[19]表明舒适度、设施水平等主观指标存在城市特异性且需大规模调研支撑，而距离是跨城市可比的核心客观指标．因此，现有框架以距离为权重基准，未来可通过附加系数扩展模型，已满足基础鲁棒性分析需求．

步骤5：连边查询．将编号后的站点、线路、权重3列信息导入MySQL，对网络连边关系进行查询，分别建立加权公交子网络$N_B=(V^B,E^B,W^B)$、地铁子网络$N_S=(V^S,E^S,W^S)$与复合子网络$N_C=(V^C,E^C,W^C)$．

1.2　网络拓扑特性指标

依据文献[20]，拓扑结构特性可以通过度分布、平均路径长度、介数、聚类系数、核数、模块性等参数表现．选取平均度$\langle k\rangle$、平均路径长度L、聚类系数C_i、介数B_i4个指标探究网络拓扑特性，计算方法为

$$\langle k\rangle=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}k_i \tag{3}$$

$$L=\frac{1}{\frac{1}{2}n(n-1)}\sum_{i>1}d_{ij} \tag{4}$$

$$C_i=\frac{2e_i}{m_i(m_i-1)} \tag{5}$$

$$B_i=\sum_{p\in N,p\neq i}\frac{\sigma_{pj}(i)}{\sigma_{pj}} \tag{6}$$

式中：k_i为节点i的度；$\langle k\rangle$为节点度的平均值；n为网络节点数；d_{ij}为节点i,j之间的最短路径；m_i为节点i的相邻节点数；e_i为节点i相邻节点间的连边数；$\sigma_{pj}(i)$为节点p,j之间最短路径经过节点i的条数；σ_{pj}为节点p到节点j之间所有最短路径的数量．

2　复合网络鲁棒性分析方法

文献[21]表示,在移除部分节点后若网络剩余节点仍保持大部分相连,则称该网络具有鲁棒性.公共交通系统鲁棒性研究,是指公交网络、地铁网络构成的复合网络系统在遭受外部干扰和内部自身状况发生变化时,维持现有运行状况的能力.当站点或者线路发生故障时,可以将故障站点及其连边视为失效,若站点间仍存在其他路径可通行,则表明该网络具有鲁棒性.

“攻击”定义为对网络节点的序贯移除过程.攻击策略并非一次性选定所有目标,而是在每一步移除一个节点后,重新计算整个网络的拓扑属性,然后基于更新后的网络状态选择下一个攻击目标,这种方法被称为自适应攻击.它模拟了一个能够根据网络实时受损情况调整策略的攻击者,相比于仅在初始状态计算一次节点重要性的“初始攻击”策略,自适应攻击能更有效地发现网络的动态脆弱性.被攻击的节点将被视为完全失效,即从网络中移除该节点及其所有相连的边.

2.1　传统攻击策略

传统网络攻击策略包括随机攻击、节点度攻击、节点强度攻击、节点介数攻击,其中随机攻击没有目的性,对各节点进行无差别攻击;节点度攻击与节点强度攻击是从网络的局部属性角度出发,考虑了节点的自身信息和邻居信息;节点介数攻击从网络的全局属性角度出发,能有效反映节点在整个网络中的作用和影响力.

节点攻击后,依次执行操作:移除该节点及其所有关联连边;若被攻击节点为耦合节点,同步移除其服务等效的3个公交站点(按度值降序选择);重新计算剩余网络拓扑指标,迭代至预设攻击比例.

2.2　改进攻击策略

2.2.1　节点中心性重要度攻击策略

传统攻击手段没有兼顾网络连边减少和最短路径的破坏,也没有考虑到节点的中心性指标.因此,提出结合度中心性、介数中心性、紧密中心性的节点中心重要度攻击策略(Centrality Importance Attack Strategy, CIAS),与传统攻击策略形成互补,记为CIAS,计算式为

$$I_i=\sqrt{\mathrm{DC}_i^{\,2}+\mathrm{CC}_i^{\,2}+\mathrm{BC}_i^{\,2}} \tag{7}$$

式中:I_i为节点i的中心性重要度;DC_i、CC_i、BC_i分别为节点i的度中心性、紧密中心性和介数中心性的归一化值.度中心性衡量节点的局部影响力,表示其直接相连的边的数量;紧密中心性反映节点到达网络各处的效率,以该节点到其他所有节点平均距离的倒数来计算;介数中心性则识别网络中的关键连接节点,以所有最短路径经过该节点的比例来衡量.

CIAS策略的设计思想源于多属性决策理论.一个CIAS值高的节点,必然是在度、介数、紧密中心性这3个维度表现突出.因此,CIAS策略的本质是识别并攻击那些集多种拓扑功能于一身的多功能关键节点,这论证了其相对于传统单一指标在识别网络核心脆弱点上的优越性.

2.2.2　考虑耦合节点的度攻击策略

为描述地铁站失效后的替代过程,引入最小替代数量的情景设定:当一个耦合的地铁站失效时,周边耦合公交是否具备足以承接基本服务的数量与能力,作为判定依据.哈尔滨个案中依据运营参数给出基准情景:当一个耦合的地铁站失效时,至少需要3个公交站点的运力吸收其转移的客流.

节点失效规则为:对网络中所有节点按度值降序排列,选择度值最高的节点进行攻击.如果是非耦合节点(普通公交站或无耦合的地铁站),直接从网络中移除该节点.如果是耦合的地铁站,检查其耦合的公交站点数量.若耦合的公交站点小于3,该地铁站的替代能力不足,直接移除该地铁站.若耦合的公交站点大于等于3,该地铁站具有功能冗余,不立即移除该地铁站,而是从其耦合的公交站点中,选择度值最高的3个进行移除.此举模拟了地铁站失效后,周边最繁忙的公交线路因无法承受转移过来的巨大客流而率先崩溃的情景.

重复上述步骤,直至达到预设的攻击比例.该策略称为考虑耦合节点替代效应的度攻击策略(Degree Attack Strategy of Coupling Nodes, DASCN).

2.3　鲁棒性评价指标

文献[21]认为网络鲁棒衡量指标由平均最短路径长度、全局效率、最大连通子图相对大小、网络连通率组成.但随着失效节点不断增加,最短路径长度呈现出先增加后减小的趋势.因此不选取最短路径长度作为衡量指标.选取全局效率G、最大连通子图相对大小Z和网络连通率U作为复合网络鲁棒性的衡量指标.计算方法为

$$G=\frac{2}{n(n-1)}\sum_{i=2}^{n}\frac{1}{d_{ij}} \tag{8}$$

$$Z=\frac{m}{M} \tag{9}$$

$$U=\frac{e}{M} \tag{10}$$

式中：M为原网络的节点数；m为最大连通子图中节点数；e为当前网络连边数.

2.4 攻击效率评价函数

采用攻击效率函数来表现研究提出的攻击策略与传统攻击策略之间的差别，计算方法为

$$Q(q)=\sum_{t=1}^{T}[1-G_q(t)][1-Z_q(t)][1-L_q(t)] \tag{11}$$

式中：$q=1,2,3,4,5,6$分别表示随机攻击策略、基于网络节点度攻击策略、节点强度攻击策略、网络节点介数攻击策略、节点中心性重要度攻击策略和考虑耦合节点的度攻击策略；$t=1,2,\cdots,T$表示攻击次数；$Q(q)$表示量化网络.

对特定攻击模式的敏感度，值越高表明网络存在中心性依赖漏洞，值越低反映网络具备拓扑冗余优势.$G_q(t)$为特定攻击策略攻击t次的全局效率；$Z_q(t)$为特定攻击策略攻击t次后的最大连通子图相对大小；$L_q(t)$为特定攻击策略攻击t次后的网络连通率.

因此，攻击效率差异并非单纯评价策略优劣，而是诊断网络脆弱性分布的结构特征.

3 实例分析

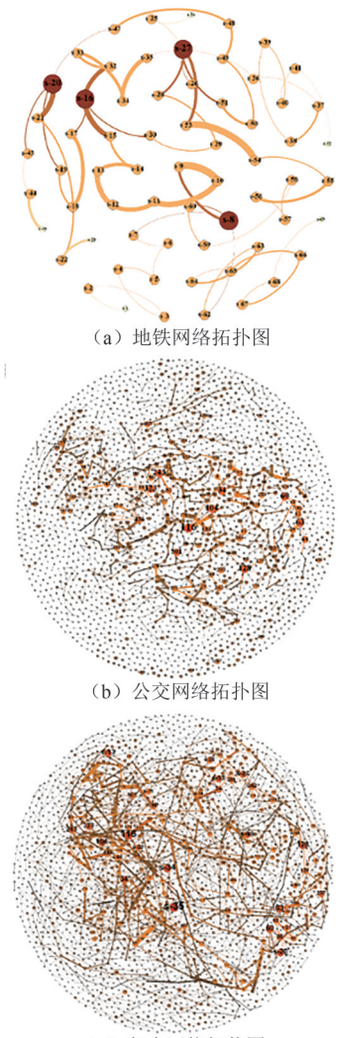
3.1 数据预处理

截至2022年底，哈尔滨市辖9区、7县，代管2个县级市.市区共有编码公交线路364条，地铁运营线路3条.选定南岗区、香坊区、道里区、道外区、松北区5个地铁主要途径行政区为研究区域构建常规公交与地铁复合网络，共获得常规公交线路255条，常规公交站点2 270个，地铁线路3条，地铁站点65个.数据主要来源于哈尔滨市交通运输部门发布的官方线路信息及高德地图接口(Application Programming Interface, API).

数据处理过程为：对原始线路和站点数据进行清洗，统一命名与编号；通过地理信息系统(Geographic Information System, GIS)缓冲区与API路径验证进行两阶段耦合；基于线路运营参数计算多因子权重，构建网络模型.

3.2 复合网络拓扑特性分析

将MySQL网络连边关系查询结果导入至Gephi软件中，得到地铁网络拓扑图、公交网络拓扑图和复合网络拓扑图，如图3所示.地铁网络节点数为65个，连边数为66条；公交网络节点数为2 270个，连边数为3 483条；复合网络节点数为2 335个，连边数为3 963条，其他网络拓扑特性值如表1所示.



(a) 地铁网络拓扑图

(b) 公交网络拓扑图

(c) 复合网络拓扑图

图3 网络拓扑

Fig. 3 Network topology diagram

表1 网络拓扑统计

Tab. 1 Network topology statistics

网络类型	节点数	边数	平均度	平均加权度	平均介数	平均路径长度	聚类系数	网络直径
地铁网络	65	66	2.031	939.581	0.146	10.198	0	27
公交网络	2 270	3 483	3.069	181.073	0.008 9	21.354	0.134	110
复合网络	2 335	3 963	3.394	182.018	0.008 3	20.406	0.163	110

3.2.1 度与度分布

哈尔滨市地铁网络结构较为简单，选取节点度值范围为1～4：度值为1的节点为首末站，度值为2～3的节点为中间站，度值为4的节点为换乘站.3类网络中度值前10的站点见表2，由表2可知，

表 2　3类网络中度值前10的站点

Tab. 2　Top 10 nodes by degree in three types of networks

地铁网络		公交网络		复合网络	
站点名	度值	站点名	度值	站点名	度值
医大二院	4	哈站	16	人民广场(地铁)	18
博物馆	4	哈站北广场	14	哈站	17
太平桥	4	会展中心	14	中央大街(地铁)	16
珠江路	4	建国公园	14	太平桥(地铁)	15
渤海路	2	建国街(康安路口)	14	西大桥(地铁)	15
镜泊路	2	建筑艺术广场	14	会展中心	15
瓦盆窑	2	市老年医院	14	哈站北广场	15
同江路	2	东直路(南直路口)	14	东直路(南直路口)	15
哈尔滨南站	2	文政街	13	市老年医院	15
哈达	2	哈西万达广场	12	建筑艺术广场	15

度值较大的节点为城市重要枢纽站和换乘站.

图4表示哈尔滨公共交通网络节点度分布和加权度分布.由图4可知:两个网络中度值为2~4的节点占比均超过70%,而公交网络和复合网络中度值大于10的节点比例分别为1.76%和3.21%.两网络的平均度值分别为3.069和3.394,表明每个站点平均连接3至4个站点,网络复合后显著提升了节点度值.

目前哈尔滨公交网络和复合网络的节点度值显著高于地铁网络,这是由于复合网络通过结合地铁和公交系统,提供了更多的连接路径,特别是对于那些地铁站与公交枢纽的换乘节点.这些节点不仅连接了地铁线路,还通过公交线路与其他站点相连,导致其度值普遍较高.

通过选择不同的坐标系可以区分度分布的形式,如图5所示.由图5可知:在半对数坐标系中,随

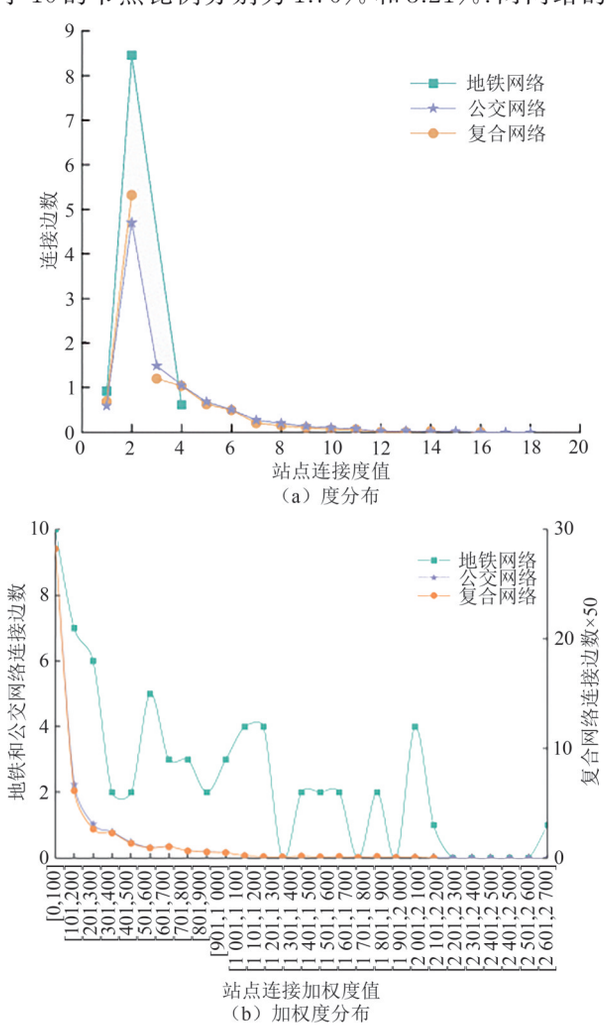


图4　网络节点度和加权度分布

Fig. 4　Degree and weighted degree distributions of network nodes

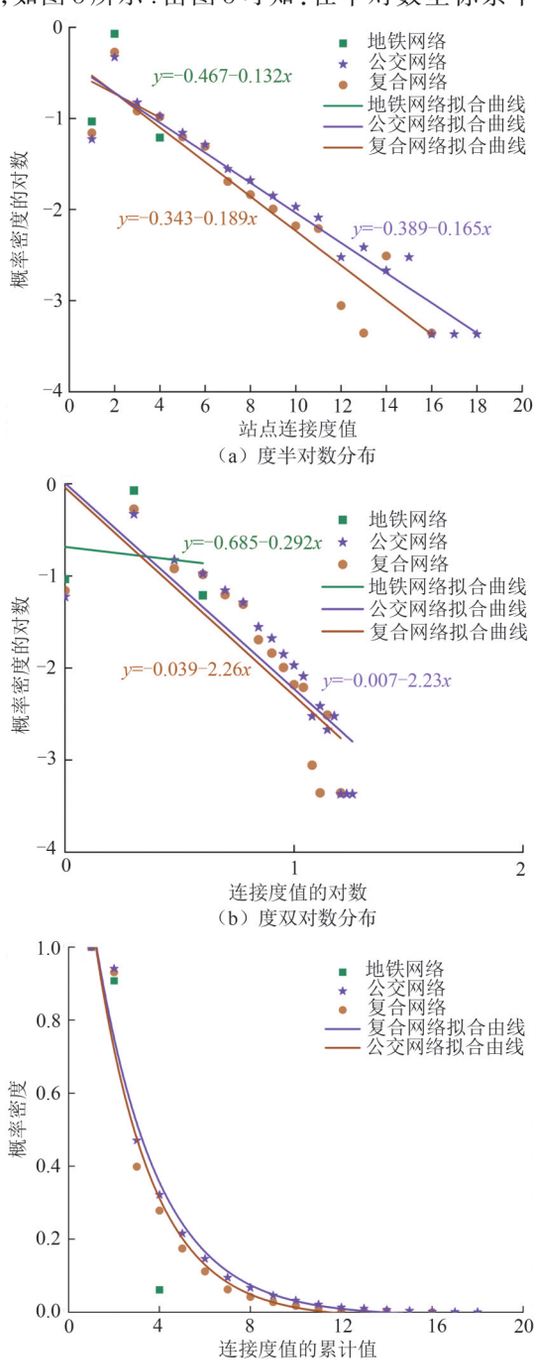


图5　网络节点度分布图

Fig. 5　Degree distribution of network nodes

机网络的节点度概率分布呈线性，而在线性坐标系中呈指数分布；无标度网络的节点度概率分布在双对数坐标中呈线性，而在线性坐标中呈幂函数，公交网络和复合网络的度分布及累积度分布均符合幂律分布，表明哈尔滨市公交网络与复合网络属于无标度网络；半对数坐标下，公交网络的节点度概率密度函数确定系数为0.933，复合网络为0.881；在双对数坐标系下，公交网络的节点度概率密度函数确定系数为0.729，复合网络为0.697.

3.2.2　平均路径长度

利用Floyd算法计算空间中任意两节点间的最短路径，最短路径长度分布如图6所示.

由图6可知：哈尔滨市地铁站点网络的平均路径长度为10.198 km，公交站点网络为21.354 km，复合网络为20.406 km，表明一次出行平均经过20个站点，公交网络与复合网络的网络直径均为110，最长路径对应节点分别为1 556～2 081和1 839～1 989.

这些直径较大的路径主要产生于地铁或公交线路的终点站之间，通常位于远离市中心的区域，反映了哈尔滨市公共交通站点分布的不均匀性，即中心城区站点密集，而末端区域线路稀疏的特征.

3.2.3　聚类系数

为描述公交站点与地铁站点之间存在有效链接，引入“网络三元组”概念.三元组是指在网络中，由3个节点组成的一个完整连接的子网络，其中每个节点与其他两个节点都有直接的连边.哈尔滨市公交站点网络与复合网络的聚类系数如图7所示.

由图7可知：公交网络平均聚类系数为0.134，复合网络平均聚类系数为0.163；地铁网络平均聚类系数为0，代表地铁网络中没有闭合三元组的存在；3个网络中聚类系数最小值均为0，聚类系数为1的节点分别占比0%、5.37%、4.84%，同时存在度值较高的站点聚类系数较低的现象，反映出哈尔滨市站点网络连接不够紧密、结构不稳定、容错性能较差.

3.2.4　介数

哈尔滨市公共交通网络节点介数如图8与表3所示.

由图8与表3可知：哈尔滨地铁网络平均介数为0.146 0，公交网络平均介数为0.008 9，复合网络平均介数为0.008 3；3个网络中绝大多数的站点介数值较低，介数最高值分别是地铁网络中的博物馆（地铁站）0.500、公交网络中的哈站（公交站）0.275及复合网络中的哈站（公交站）0.265.

随着网络规模的增加，节点平均介数呈下降趋势.对比网络介数与网络节点度发现，网络介数高的节点度值不一定高，存在着介数值高、度值低，度值高、介数值低的现象.

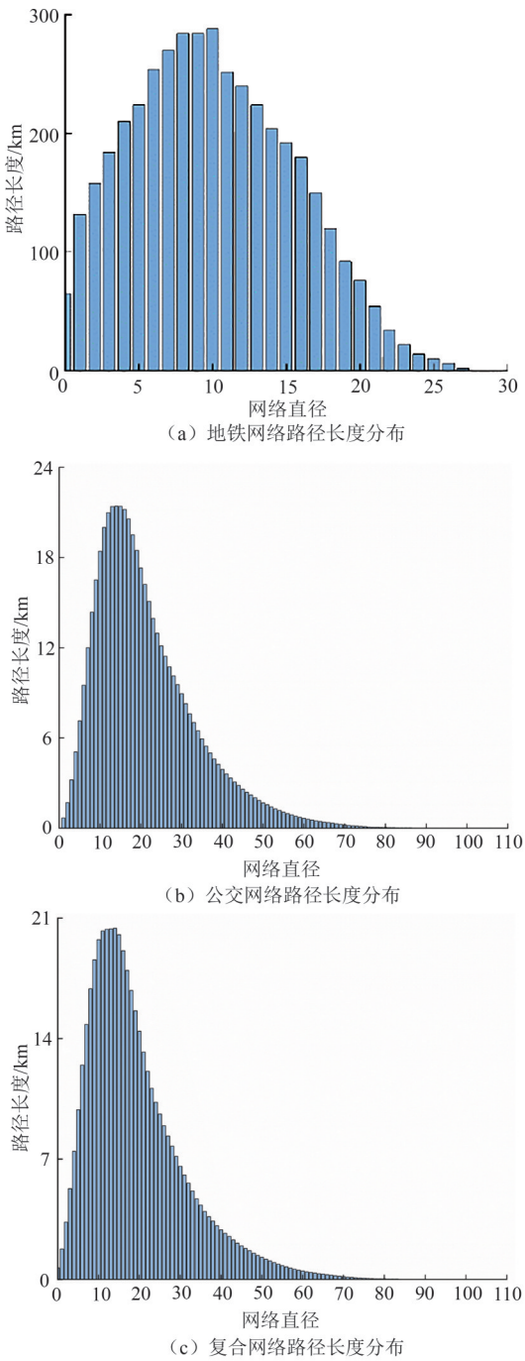
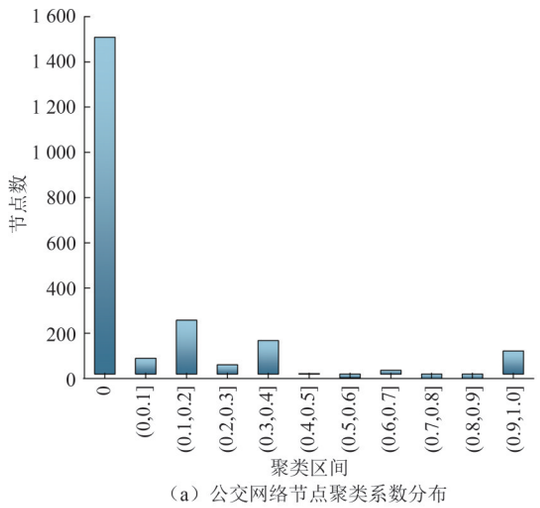


图6　最短路径长度分布

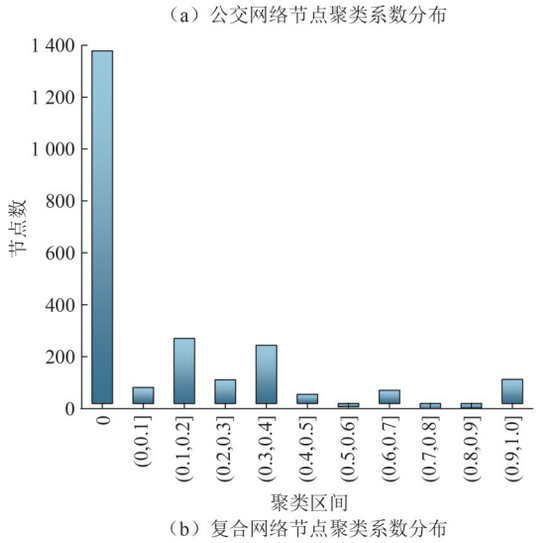
Fig. 6　Distribution of the shortest path lengths

3.3　复合网络鲁棒性分析

复合网络相较于单一公交网络的平均路径长度缩短和聚类系数提升，表明站点间连通效率提高与局部密集性改善.拓扑优化直接反映在鲁棒性指标中：复合网络的全局效率初值（0.071 5）显著高于公交网络（0.068 8），且最大连通子图相对大小在攻击下的衰减速率更低.节点度分布的无标度特性解释



（a）公交网络节点聚类系数分布



（b）复合网络节点聚类系数分布

图 7　网络节点聚类系数分布

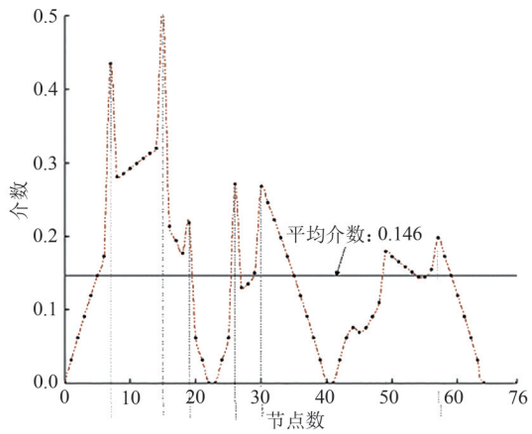
Fig. 7　Distribution of network node clustering coefficients

了网络对随机攻击的高鲁棒性,但对针对性攻击(如CIAS策略)仍表现出脆弱性,印证了“枢纽节点主导网络稳定性”的典型无标度网络特征.

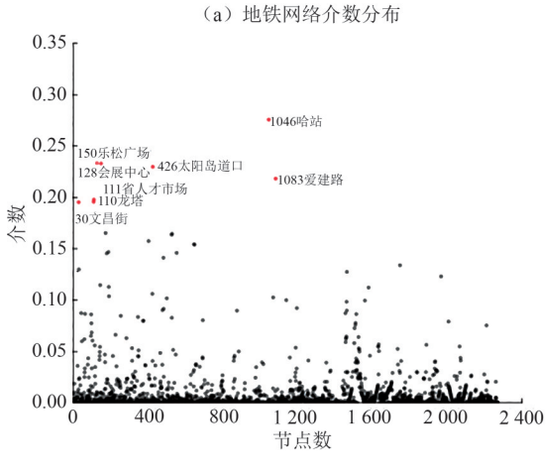
复合网络表现出更强抗扰性的内在机理主要源于两个方面:网络冗余度的显著增加和网络形成了更优化的“核心-边缘”结构.地铁线路的加入,为原有的公交网络提供了高效、大量的备用路径,缩短了网络的平均路径长度,增加了节点间的路径选择.当网络部分节点失效时,连通性的增强使得客流能更有效地重新分配.地铁线路与关键换乘枢纽构成了高效的运输核心,而密集的公交网络则作为边缘负责客流的集散.这种分工明确的层级结构,相较于单一网络,能更好地隔离局部故障,防止其迅速蔓延至整个系统.

3.3.1　公交网络鲁棒性

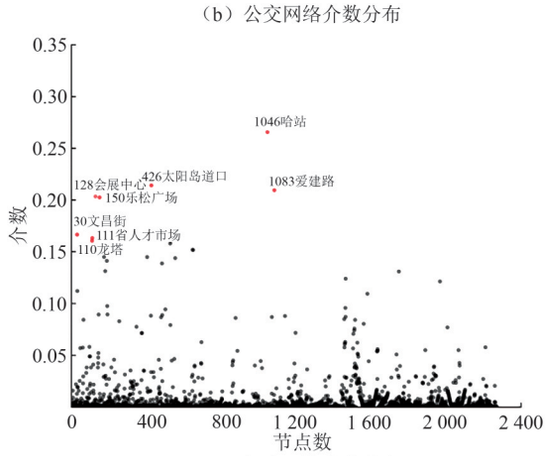
公交网络鲁棒性指标如图9所示.由图9可知:公交网络的全局效率初始值为0.068 8,采取不同攻击策略,公交网络的全局效率变化均呈现下降趋势;



（a）地铁网络介数分布



（b）公交网络介数分布



（c）复合网络介数分布

图 8　网络节点介数分布

Fig. 8　Distribution of network node betweenness

随机攻击策略下网络全局效率下降平稳,节点度攻击策略与节点强度攻击策略下降速率相似,中心性重要度攻击策略与节点强度攻击策略下降速率也大致相同;当5%的节点被攻击时,网络的效率下降到起始效率的一半以下,全局效率下降速率排序为:介数攻击策略>中心性重要度攻击策略>节点强度攻击策略>度攻击策略>随机攻击策略.

哈尔滨市的公交网络在市中心区域的站点通常具备较高的节点度和连接性,因此随机攻击不会立刻导致网络的结构崩溃.节点度攻击和节点强度攻

表 3　3 类网络中介数前 10 的站点

Tab. 3　Top 10 nodes by betweenness in three types of networks

地铁网络		公交网络		复合网络	
站点名	度值	站点名	度值	站点名	度值
博物馆	0.507	哈站	0.275	哈站	0.265
医大二院	0.435	会展中心	0.233	太阳岛道口	0.214
铁路局	0.319	乐松广场	0.233	爱建路	0.209
哈工大	0.312	太阳岛道口	0.229	会展中心	0.203
西大桥	0.306	爱建路	0.218	乐松广场	0.202
和兴路	0.299	省人才市场	0.197	文昌街	0.166
学府路	0.292	龙塔	0.195	省人才市场	0.163
理工大学	0.285	文昌街	0.195	龙塔	0.160
黑龙江大学	0.281	哈师大(南校区)	0.165	长江路(香福路口)	0.159
珠江路	0.271	长江路(香福路)	0.164	长江路(化工路口)	0.158

击的策略通过有目的地攻击核心站点,迅速破坏网络的连通性,导致最大连通子图的相对大小迅速下降.相比之下,中心性重要度攻击和介数攻击则通过切断关键枢纽节点的连接,表现出网络的脆弱性,特别是对于枢纽节点的攻击使得网络连接性大幅下降.

在哈尔滨市公交网络中,市中心区域的站点连接性较强,因此随机攻击不会对连通率产生快速影响.然而,度攻击和节点强度攻击通过集中攻击重要交通枢纽,导致网络的连通率迅速下降,尤其是对于外围区域的站点,连接性较弱,失效后的连通率下降更为显著.相对而言,中心性重要度攻击和介数攻击在攻击到关键枢纽节点时,表现出较高的攻击效率,加剧网络连通率的下降.

3.3.2　复合网络鲁棒性

复合网络鲁棒性指标如图 10 所示.由图 10 可知:复合网络全局效率初值为 0.071 5,随机攻击策略的全局效率变化曲线始终高于其他策略;在全局效率区间(0.025,0.071 5)内,攻击速度排序为度>中心性重要度>介数>考虑耦合节点的度>节点强度>随机;在(0.01,0.025)区间内,排序变为度>考虑耦合节点的度>中心性重要度>强度>介数>随机;度攻击策略下全局效率最先趋于 0,随后依次是考虑耦合节点的度、中心性重要度、介数和随机攻击策略.

在复合网络中,由于公交和地铁系统之间的耦合,随机攻击对网络连通率的影响较小,网络能够通过不同的交通模式保持一定的连通性.当攻击集中在度攻击和节点强度攻击的高连接度枢纽节点时,网络连通率迅速下降.这些枢纽节点的失效直接导致多个交通线路的断裂,严重影响网络的整体连通性.

复合网络通过地铁和公交网络的耦合,在一定

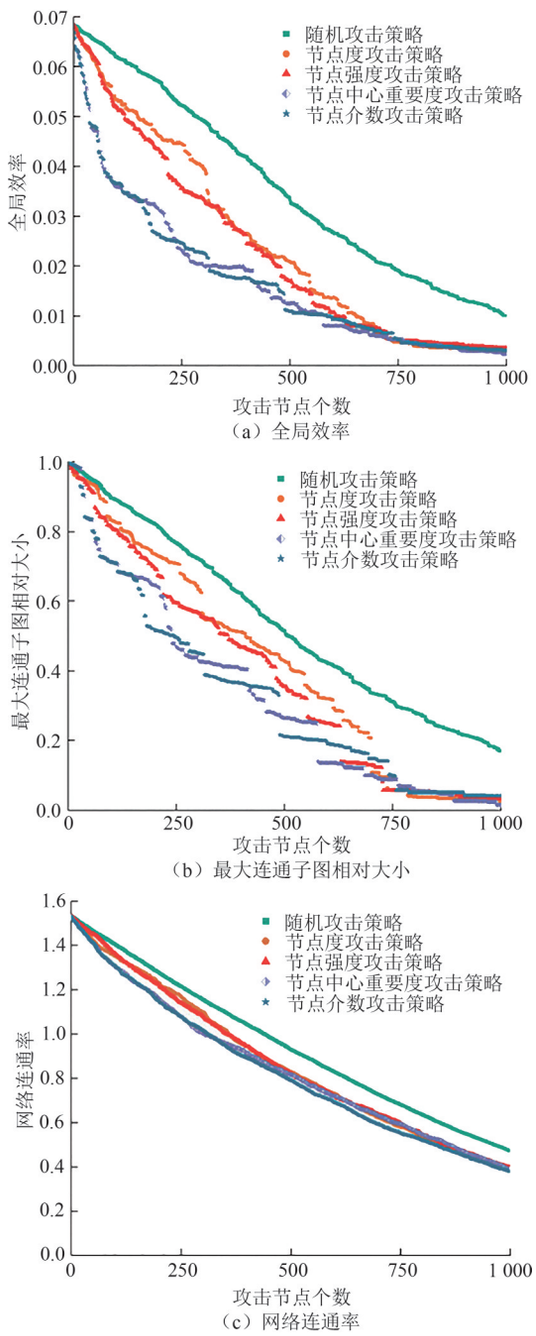
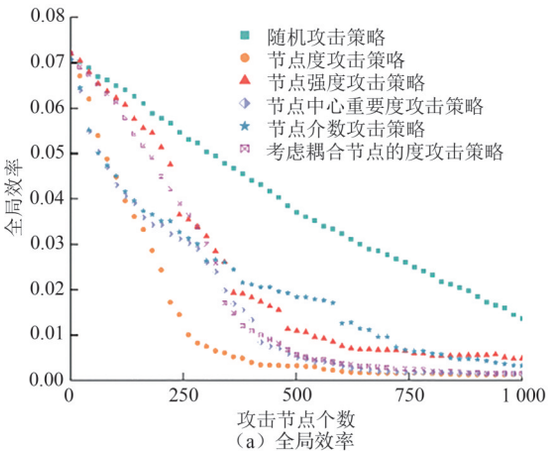


图 9　公交网络鲁棒性指标分布

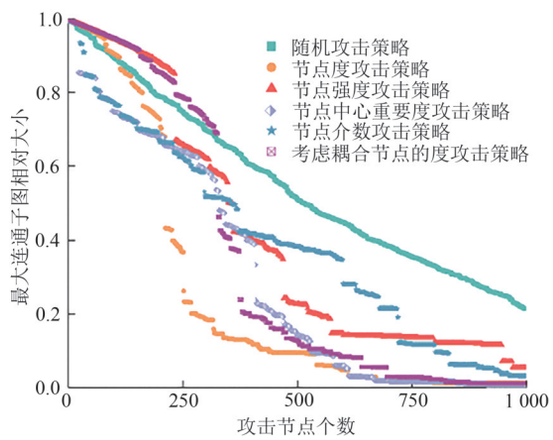
Fig. 9　Distribution of robustness indicators of the bus network

程度上提高了网络的冗余度,使得在遭受随机攻击时,网络的全局效率下降较为缓慢.然而,在度攻击和中心性重要度攻击等策略下,网络中的关键节点失效后,网络的整体效率迅速下降,尤其是关键枢纽节点的失效直接影响到全网的数据传输和运行效率.

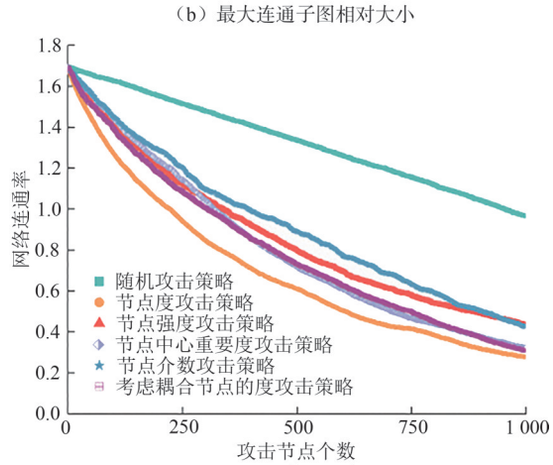
相较于单一公交网络,复合网络的全局效率初始值和连通率初始值均显著提升,表明公共交通方式的复合有助于增强网络稳定性,并提高节点间传输能力和效率.对比传统度攻击策略与新提出的考虑耦合节点的度攻击策略,在相同攻击规模下,度攻



（a）全局效率



（b）最大连通子图相对大小



（c）网络连通率

图 10　复合网络鲁棒性指标分布

Fig. 10　Distribution of robustness indicators in the composite network

击策略在复合网络的全局效率、最大连通子图相对大小和网络连通率均高于传统度攻击策略.这表明复合网络对考虑耦合节点的度攻击具有更强的鲁棒性,突显了在网络破坏分析中考虑耦合节点特性的重要性.DASCN 策略揭示并量化了耦合节点的功能冗余与替代效应.传统度攻击会直接移除网络中度值最高的节点,导致网络结构瞬间受到巨大冲击.相比之下,DASCN 策略模拟了更符合现实的失效过程:当一个耦合的地铁站失效时,其运输功能并非完全消失,而是由周边紧密连接的公交站点部分承接.这表明公交网络为地铁系统提供了重要的疏散冗余,而地铁也为公交网络分担了骨干运输压力.这种耦合关系使得整个复合网络在面对针对性攻击时表现出更高的稳定性.

4　结论

1）相较单一网络,复合组织使连通效率与局部密集性得到改善,并体现出更强的鲁棒性;其内在机理在于网络冗余度提升与更优化的“核心-边缘”结构,使客流可在失效情景下实现更有效的重分配与隔离.

2）案例的网络呈现无标度网络特征,对随机攻击相对稳健,但对针对性攻击(如节点中心性重要度攻击策略)更为敏感,揭示了由枢纽节点主导的脆弱性格局.

3）节点中心性重要度攻击策略能识别并优先打击集多种拓扑功能于一身的关键节点,对系统性能的负面影响更大;考虑耦合节点的度攻击策略通过引入耦合场景下的替代与分担能力,对全局效率、最大连通子图相对大小和网络连通率的冲击小于传统度类策略.

4）以出行时间与线路载运能力构建加权复合网络更贴近运行组织;建议在运维与规划中强化换乘边与耦合站点的服务与组织水平,以降低在定向失效情景下对节点效率、连通的影响.

本文在构建加权网络时主要考虑了线路载运能力与乘客出行时间,未考虑线路实时客流量,如果在权重中加入实时客流量数据,对网络分析会更加准确,这些内容可作为下一步的研究内容.

参考文献(References):

[1] WANG F J, RUAN S B. The homogeneity research of urban rail transit network performance[C]//2016 5th International Conference on Transportation and Traffic Engineering. Lucerne, 2016: 1－6.

[2] DE REGT R, VON FERBER C, HOLOVATCH Y, et al. Public transportation in Great Britain viewed as a complex network[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2019, 15(2): 722－748.

[3] 胡宝雨, 裴玉龙, 何南. 哈尔滨公交复杂网络建模与特性分析[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(9): 20－25.
HU Baoyu, PEI Yulong, HE Nan. Modeling and characteristics analysis of bus transport complex network of Harbin [J]. Journal of Wuhan University of Technology,

2017, 39(9): 20－25.(in Chinese)

[4] 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.
QIANG Tiangang, ZHAO Mingming, PEI Yulong. An analysis of characteristics of complex network and robustness in Harbin multi-mode traffic network[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(1): 65－71.(in Chinese)

[5] 罗艺, 钱大琳. 公交-地铁复合网络构建及网络特性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5): 39－44.
LUO Yi, QIAN Dalin. Construction of subway and bus transport networks and analysis of the network topology characteristics[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 39－44.(in Chinese)

[6] ZHANG L, LU J, FU B B, et al. A review and prospect for the complexity and resilience of urban public transit network based on complex network theory[J]. Complexity, 2018, 2018: 2156309.

[7] LI M, YU W, ZHANG J. Clustering analysis of multilayer complex network of Nanjing metro based on traffic line and passenger flow big data[J]. Sustainability, 2023, 15(12): 9409.

[8] FENG J, LI X M, MAO B H, et al. Weighted complex network analysis of the Beijing subway system: Train and passenger flows[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 474: 213－223.

[9] 张旭. 基于加权复杂网络的城市公交线网等级划分与结构优化研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
Zhang Xu. Hierarchy classification and structure optimization of urban public transit line based on weighted complex network[D].Xi'an: Chang'an University, 2018.(in Chinese)

[10] ABDELATY H, MOHAMED M, EZZELDIN M, et al. Temporal robustness assessment framework for city-scale bus transit networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, 606: 128077.

[11] MA F, LIU F, YUEN K F, et al. Cascading failures and vulnerability evolution in bus-metro complex bilayer networks under rainstorm weather conditions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(3): 329.

[12] 宋英华, 李玉枝, 霍非舟, 等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2): 114－120.
SONG Yinghua, LI Yuzhi, HUO Feizhou, et al. Vulnerability of two-layer traffic network of bus and subway under waterlogging condition based on complex network theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(2): 114－120.(in Chinese)

[13] WANG Z Q, PEI Y L, ZHANG J H, et al. Vulnerability analysis of public transit systems from the perspective of the traffic situation[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2024, 634: 129441.

[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.
PAN Hengyan, ZHANG Wenhui, HU Baoyu, et al. Construction and robustness analysis of urban weighted subway-bus composite network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2582－2591.(in Chinese)

[15] 程国柱, 张宇洁, 冯天军. 严寒城市地铁-公交复合网络承载力计算方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 101－110.
CHENG Guozhu, ZHANG Yujie, FENG Tianjun. Carrying capacity calculation method of subway-bus composite network in severe cold city[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 101－110.(in Chinese)

[16] 张宁, 戴洁, 张晓军. 基于多项Logit模型的轨道交通站点步行接驳范围[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(5): 46－49.
ZHANG Ning, DAI Jie, ZHANG Xiaojun. Walking affect area of rail transit station based on multinomial logit model[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(5): 46－49.(in Chinese)

[17] ZIELSTRA D, HOCHMAIR H H. Comparative study of pedestrian accessibility to transit stations using free and proprietary network data [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2217(1): 145－152.

[18] EL-GENEIDY A, GRIMSRUD M, WASFI R, et al. New evidence on walking distances to transit stops: Identifying redundancies and gaps using variable service areas[J]. Transportation, 2014, 41(1): 193－210.

[19] 陈海伟, 徐士伟, 巫瑶敏, 等. 城市轨道交通接驳换乘距离适宜性研究[J]. 交通与港航, 2020, 7(2): 40－46.
CHEN Haiwei, XU Shiwei, WU Yaomin, et al. Study on the suitability of urban rail transit transfer distance [J]. Communication & Shipping, 2020, 7(2): 40－46.(in Chinese)

[20] 郭世泽, 陆哲明. 复杂网络基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
GUO Shize, LU Zheming. Basic theory of complex networks[M]. Science Press, 2012.(in Chinese)

[21] CHEN H H, LIN A M. Complex network characteristics and invulnerability simulating analysis of supply chain[J]. Journal of Networks, 2012, 7(3): 591－597.