

都市圈多模式交通网络韧性分析和优化策略研究* ——以长株潭都市圈为例

Research on Resilience Analysis and Optimization Strategies of Multi-modal Transportation Network in Metropolitan Region: A Case Study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region

覃佐彦 焦胜 QIN Zuoyan, JIAO Sheng

摘要 都市圈的多模式交通网络 (Multi-modal Transportation Network, MTN) 已经成为城市化发展的重要载体,它比单一交通网络更为复杂。为研究都市圈MTN应对攻击时的韧性变化特征,依托复杂网络理论和都市圈层面的多种交通模式,建立都市圈MTN复杂网络模型的建模方法。以运行效率、最大连通子图、结构熵等网络特征为内涵,构建吸收能力、连通能力、恢复能力3个维度的MTN综合韧性评估指标体系。通过单点攻击的方法获取各个指标值,并采用熵权法分析各指标在综合指标计算中的权重。整合长株潭都市圈铁路、地铁、城际汽车客运数据,基于NetworkX框架构建长株潭都市圈MTN拓扑模型。基于计算结果,以提升长株潭都市圈MTN韧性为核心导向,从优化换乘节点布局、优化交通网络分布、加强关键节点保护、增加备用线路等方面提出长株潭都市圈MTN的优化策略,以期为长株潭都市圈MTN的规划建设提供科学依据和决策支持。

Abstract The multi-modal transportation network (MTN) in metropolitan areas has become an important part of urbanization development, which is more complex than a single transportation network. To evaluate the resilience change of metropolitan MTN under attacks, a modeling method for the metropolitan MTN is established based on complex network theory. Taking network characteristics such as operational efficiency, the largest connected component, and structural entropy as the connotation, a comprehensive resilience evaluation index system for MTN is constructed from three dimensions: absorptive capacity, connectivity capacity, and recovery capacity. Based on index values obtained through single-point attack methods, the entropy weight method is used to analyze the weights of each index in the calculation of comprehensive indicators. By integrating the data of railways, subways, and intercity bus passenger transport in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region, a topological model of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region MTN is constructed based on the NetworkX framework. Based on the calculation results, focusing on enhancing the resilience of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region MTN, optimization strategies are proposed from aspects of optimizing transfer node layout, improving transportation network distribution, strengthening node protection, and adding backup lines. These strategies provide a scientific basis and decision-making support for the planning and construction of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region MTN.

关键词 全过程实施;现状底图;建构方法;空间认定

Key words whole process implementation; current land use base map; construction method; spatial identification

文章编号 1673-8985 (2025) 04-0129-07 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20250418

作者简介

覃佐彦

湖南大学建筑学院 博士研究生

焦胜 (通信作者)

湖南大学建筑学院

教授,博士生导师,副院长

jiaosheng2008@163.com

0 引言

在城市化进程加速和城市空间形态基本成型的背景下,由一个或多个核心城市和与其有紧密经济、交通联系的邻接城镇组成的都市圈^[1]成为大城市区域发展的重要载体和增长

极^[2]。都市圈高质量发展依赖于区域交通一体化程度^[3],发挥交通先行作用是构建都市圈新发展格局的重要途径^[4]。在我国都市圈一体化不断推进的背景下,都市圈内高速公路、高速铁路、地铁等单一交通方式的基础设施建设取

*基金项目:国家自然科学基金项目“基于内涝风险影响机制的中部地区超大城市雨洪安全格局研究”(编号52278059);长株潭都市圈重大课题研究项目“大TOD模式下的长株潭都市圈应急疏散体系构建研究”(湘财采计[2025]000454号)资助。

得了显著成就。但是,随着极端气候频现,都市圈MTN面对自然灾害、突发事件干扰的正常运行能力面临巨大挑战,如何强化都市圈交通基础设施韧性成为城市规划管理部门需要解决的关键问题。

韧性首先由生态学领域提出^[5],后引入交通运输研究领域^[6],主要是通过构建运输网络数学模型和评估指标,研究交通网络在面对不同干扰时的恢复能力和性能表现^[7]。如MILLER-HOOKS E等^[8]通过数学模型模拟计算不同灾害场景下的灾后运输能力来评估货运交通网络的韧性,并提出韧性提升策略。

目前对于交通网络韧性的研究集中于面对攻击情景下恢复策略研究^[9],且多为单一交通网络的韧性研究。张洁斐等^[10]对于采用复杂网络理论,以Space L方法构建地铁网络拓扑,使用韧性指数评估方案,以南京地铁网络为实例,研究了不同恢复策略的效果。黄莺等^[11]以网络平均效率为韧性指标,利用遗传算法求解西安地铁在小规模和大规模站点失效场景下的最优恢复策略。张开冉等^[12]针对城市轨道交通网络韧性优化问题构建了双层模型,通过NSGA-II和MSWA算法求解最优恢复策略。李洁等^[13]通过组合赋权和逆向云发生器计算特征值,以隶属度最大原则判定韧性等级,提出高速公路网交通韧性评价方法。路庆昌等^[14]提出考虑多对一和一对多耦合特性的地铁网络韧性评估方法,量化分析了牵引电网与地铁网络的交互影响。化星琳等^[15]2007从集聚性、传属性和层级性等角度比较了成都都市圈、武汉都市圈、南京都市圈的公路网络韧性特征,并以连通性为指标对突发情景下的网络动态韧性进行了测度。

多模式交通网络韧性研究方面,现有研究多基于复杂网络理论和拓扑指标进行研究,彭翀等^[16]以公路、铁路客运数据为基础,将多模式交通抽象为以交通联系强度为基础的城市网络,评估城市网络结构韧性并提出韧性提升策略。赵成勇等^[17]以西安都市圈为研究对象,分别对MTN遭受攻击时的网络性能损失阶段、不同恢复策略进行模拟。马书红等^[18]以

吸收能力A、缓冲能力B、可恢复能力R等3个维度评价关中城市群MTN在受到攻击之后的韧性变化和恢复策略。鞠艳妮等^[19]基于多层相依网络理论,结合熵权法构建韧性评估模型,识别对韧性影响最大的节点均为相依节点。王永岗等^[20]构建多模式交通网络拓扑模型,通过耦合强度、控制度和协同度等耦合脆弱性评估指标识别网络中的薄弱节点。马飞等^[21]150构建了多制式区域轨道交通(MRRT)相依网络模型,引入灰色攻击策略模拟不同信息精确度 α 下的攻击场景,并对 α 和网络韧性的相关性进行了分析。

综上所述,当前单模式交通网络韧性和多模式网络韧性相关理论还处于发展阶段,对于交通网络韧性的分析尚未形成统一的评价指标体系,但对韧性的定义基本达成共识,即网络受到攻击后的抗扰动能力。对MTN进行测度的研究主要分析了空铁公网络和多制式轨道网络,尚未有针对都市圈层面的多模式网络(区域铁路、城市轨道交通和公路客运)的研究。此外,目前关于MTN的研究更多关注韧性恢复策略,缺少基于韧性的网络结构优化策略研究。

MTN与单一交通模式网络的差别在于,都市圈MTN某单一交通方式的节点因灾害瘫痪时,滞留旅客可以通过其他交通方式进行疏散,在建立MTN模型时需要考虑不同交通网络之间的耦合问题,可以通过多层相依网络理论^[22]来构建多模式交通网络,并进行网络分析。

本文选取长株潭都市圈^①MTN为研究对象,从吸收能力、连通能力、恢复能力3个维度构建综合韧性测度指标,观察长株潭都市圈MTN在节点失效情景下的动态韧性能力,并提出长株潭都市圈MTN的优化策略。

1 建模和评价指标

1.1 都市圈MTN韧性测度流程

借鉴其他研究通过打断节点连通性模拟网络中断的仿真方法,使用随机攻击和蓄意攻击两种中断策略^[15]2008, [21]¹⁴⁹,分别对应现实场

景中的高频、低损的广布型事件与低频、高损的突发性事件对MTN造成的影响,获取MTN的韧性动态演化过程。观测指标为各分项指标和综合韧性指标,都市圈多模式交通网络韧性测度流程如图1所示。

1.2 都市圈MTN复杂网络模型建模

1.2.1 NetworkX框架

NetworkX为使用Python语言开发的库,提供了包括最短路径、中心性分析、聚类系数分析在内的诸多算法,用于研究复杂网络的结构、动态和功能,目前广泛应用于交通运输、生物信息学等领域。本文基于Python语言,使用NetworkX作为构建复杂网络的建模工具。

1.2.2 单模式网络模型构建

在长株潭都市圈多模式交通网络中,高速铁路、城际铁路、普速铁路和地铁依托铁路网和地铁网络,实现都市圈城市之间铁路站、地铁站的连接。城际公路主要通过城际客车根据客运班次实现汽车客运站之间的连接。本文选取都市圈内城际铁路、高速铁路、普通铁路、地铁、城际客运构建都市圈MTN,为了让拓扑网络更能反映实际网络连接特征,便于分析网络的连通性,对于铁路、地铁和汽车客运,只要是节点之间有直达的线路,按照规则构建无权无向边。所有运输模式均为超级网络。

(1) 铁路交通网络。将都市圈内铁路客

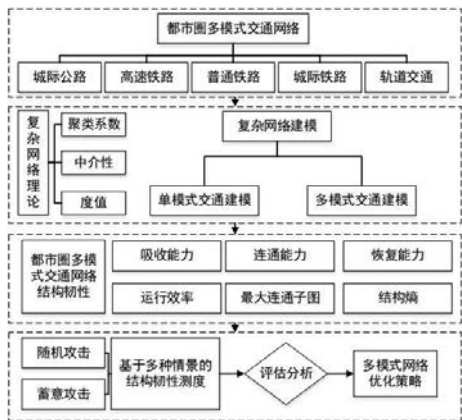


图1 都市圈MTN韧性测度流程
Fig.1 The measurement process of the structural resilience of the MTN in the metropolitan region
资料来源:笔者自绘。

注释: ① 长株潭都市圈位于长江经济带和京广经济带的交汇节点,为全国第4个国家级都市圈、中部第1个国家级都市圈、湖南省实施“三高四新”美好蓝图主阵地,范围包括长沙市全域、株洲市中心城区及醴陵市、湘潭市中心城区及韶山市和湘潭县,总面积1.89万km²。

运站点映射为网络节点,构建铁路交通网络节点集 $N_r=\{n_i\}$,其中下标 r 表示铁路交通, i 表示铁路交通网络中第 i 个节点编号。通过查找互联网平台发布的列车发车时刻表,定义列车班次中经过的节点之间相互可以通达,即 n_i 和 n_j 之间有连边,构建铁路交通网络边集合 $E_r=\{e_{ij}\}$, ij 表示铁路网络中 i 节点与 j 节点的连边。基于铁路网络节点集 N_r 和连边节点集 E_r ,构建节点邻接矩阵 $M_r=(m_{ij})_{n \times n}$, n 为 N_r 中的节点数,如果有连边,则 $m_{ij}=1$ 。将 N_r 、 E_r 、 M_r 基于NetworkX框架建立铁路网络拓扑结构图,对于高速铁路、城际铁路、普速铁路均采用此方式进行模型构建。

(2) 地铁网络。地铁线路发车为固定班次,单条线路上所有站点相互之间均存在通行班次,基于此构建地铁超级网络。首先对单条地铁交通线路,按照地铁站构建节点集 $N_m=\{n_{mji}\}$,其中下标 m 表示地铁, j 表示第 j 条地铁线路, i 表示第 j 条地铁线路的第 i 个地铁站点,对于该线路中的所有地铁站点,构建地铁普通边集合 $E_m=\{e_{mji'j'}$ },下标 jii' 代表该边为第 j 条线路的第 i 个站点和第 j' 个站点的连边,即单条地铁线路任意一对站点之间均存在连边。其次对地铁换乘站,构建两条线路之间的地铁换乘边集合 $E_{mt}=\{e_{mjipq}\}$, t 表示换乘, e_{mjipq} 代表 j 线路和 p 线路分别在 i 站点和 q 站点存在换乘边。综上建立地铁网络拓扑结构图。

(3) 公路客运网络。将都市圈内的城市公路客运站点映射为网络节点,构建城市公路交通网络节点集 $N_b=\{n_{bi}\}$,其中下标 b 表示城市公路客运。基于客运站点之间的班次情况,如果两站点 n_{bi} 和 n_{bj} 之间有班次通达,则定义 n_{bi} 和 n_{bj} 之间有一条连边,构建公路客运网络连边集合 $E_b=\{e_{bij}\}$ 。综上建立公路客运网络拓扑结构图。

1.2.3 MTN模型构建

在都市圈交通中,对于一些交通枢纽,往往存在多种交通方式组合的现象,本文考虑都市圈交通的尺度,定义两种情况下不同模式之间的耦合关系。

(1) 交通枢纽节点之间的耦合。在大

城市,如长沙市,一般会集中设置集铁路、地铁、公路客运为一体的交通枢纽,且城市内一般存在多个交通枢纽,此时定义在步行舒适时间范围内可达(10 min步行,按照成人步行速度,步行距离约800 m)的不同交通方式节点为耦合节点,耦合节点之间定义一条耦合边。

(2) 区县站点节点之间的耦合。对于都市圈的中小城镇或外围区县,如醴陵市,一般不会设置综合交通枢纽,即公路客运与铁路客运站点不在同一处,站点之间的距离远超步行可接驳范围,此时定义为若两个站点之间可以通过市内交通方式可达,即认为这两个站点之间存在耦合边。

(3) 都市圈多模式交通复杂网络模型构建。构建耦合边集合 $E_c=\{e_{c1}, \dots, e_{c\beta}\}$, β 为耦合边的总数。将每种单模式交通网络节点集构建多模式节点集 $N_s=N_r \cup N_m \cup N_b$ 和连边集 $E_s=E_r \cup E_m \cup E_b \cup E_c$,构建MTN邻接矩阵 $M_s=(m_{ij})_{m \times m}$, m 为所有节点数量之和。

1.3 都市圈MTN韧性评估指标

结合既有相关研究及都市圈MTN的特点,都市圈MTN(包括铁路、地铁、公路等多种方式)的韧性被定义为都市圈复合交通网络中的节点受到攻击(如自然灾害、事故或故障等),导致部分节点瘫痪,都市圈MTN对影响的吸收、在部分节点瘫痪状态下继续运行,并在合理时间内恢复到初始运行水平的能力。在都市圈MTN韧性内涵分析的基础上,吸收能力、连通能力和恢复能力是MTN韧性的3个特征指标。

1.3.1 吸收能力

吸收能力指网络减少攻击影响的内在能力^[23]。MTN吸收能力可以定义为网络抵抗攻击、维持稳定运行水平的能力。网络传输的稳定性越高,整体网络抵抗扰动的韧性越高。而网络运行效率是反映MTN传输性能的重要指标。网络运行效率越高,表示网络节点相互之间的可达性高、传输性能好。因此用运行效率表征网络的吸收能力,吸收能力指标的计算方法如公式

(1)、(2)所示。

$$R_1 = \frac{o'}{o_0} \quad (1)$$

式中: R_1 为多模式网络的运行能力指标, O' 代表网络受到攻击后的运行效率, O_0 代表网络未受到攻击时的运行效率。

$$O = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{minij}} \quad (2)$$

式中: O 为MTN的运行效率; d_{minij} 为节点 i 和 j 之间的最短路径长度,当 i 和 j 之间没有可达路径时, d_{minij} 为无穷大, $\frac{1}{d_{minij}}=0$ 。

1.3.2 连通能力

MTN的连通能力定义为遭受攻击后,网络局部维持正常运行的能力。随着网络中的节点由于攻击失效,引起网络损失掉失效节点和与失效节点相连的连边,导致网络的整体结构遭到破坏,但是网络仍然可以在局部维持运行。连通子图描述为网络中存在连边的节点规模,表征网络整体形态结构的连通状况。最大连通子图为网络中断后分解的子图中节点总数最多的子图。随着节点在攻击下陆续失效,最大连通子图数不断减少,最大子图的状态发生突然变化,表示网络进入迅速解离阶段,最大连通子图数衰减速度越慢,表示网络韧性水平越高。因此使用最大连通子图数来表征网络受到攻击后的连通能力。连通能力用 R_2 表示,计算如公式(3)所示。

$$R_2 = \frac{p'}{p_0} \quad (3)$$

式中: R_2 为多模式网络的连通能力指标; p' 代表网络受到攻击后的最大连通子图数; p_0 代表网络未受到攻击时的节点数量。

综合考虑拓扑结构与网络运输功能,对网络受灾后的连通能力 R_2 进行修正如公式(4)所示。

$$R_2 = \frac{p' e'}{p_0 e_0} \quad (4)$$

式中: e_0 和 e' 分别代表网络受到攻击前后的最大连通子图的连边数。

1.3.3 恢复能力

恢复能力是指网络受到攻击后,快速恢复到初始状态的能力^[24]。熵的物理意义为体系混乱程度的度量,考虑网络的拓扑结构和动力学特性,结构熵可量化网络结构的稳定程度从而反映体系所具备的恢复能力。在交通系统中,交通网络结构熵越小,表明网络结构稳定性越差,所对应的韧性越差,表现为面临交通客流或应急事件冲击时,网络难以抵抗和吸收。因此可以通过结构熵来评价网络的恢复能力,恢复能力的计算式见公式 (5) - (7)。

$$R_3 = \frac{S'}{S_0} \quad (5)$$

式中: R_3 代表恢复能力指标; S' 代表网络受到攻击后的结构熵; S_0 为代表网络未受到攻击时的结构熵。

$$S = -\sum_{i=1}^N I_i \ln I_i \quad (6)$$

式中: I_i 为第 i 个节点的重要度; N 为复杂网络中的节点总数。

$$I_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (7)$$

式中: k_i 为第 i 个节点的度值,即为复杂网络中与节点相连边的数量。

1.3.4 综合韧性指标

基于前述韧性评估指标分析,对吸收能力、连通能力和恢复能力3个维度上的指标进行标量数据标准化处理,构建MTN综合韧性指标 R ,计算方法如公式 (8) 所示。

$$R = \sum_{\delta \in \alpha} R_{\delta} \mu_{\delta} \quad (8)$$

式中: R_{δ} 为表示第 δ 种韧性评价指标维度下的网络韧性水平, μ_{δ} 表示第 δ 种韧性评价指标权重, α 代表不同维度韧性评价指标的数量。

考虑权重计算的客观性,选取熵权法来确定指标权重 μ_{δ} , μ_{δ} 计算过程如公式 (9) - (12) 所示。

$$\mu_{\delta} = \frac{1 - \lambda_{\delta}}{\sum_{\delta} (1 - \lambda_{\delta})} \quad (9)$$

$$\lambda_{\delta} = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N p_{\delta i} \ln p_{\delta i} \quad (10)$$

式中: λ_{δ} 为第 δ 个特征值的熵值。

$$p_{\delta i} = \frac{y_{\delta i}}{\sum_{i=1}^N y_{\delta i}} \quad (11)$$

式中: $p_{\delta i}$ 代表对于第 δ 个特征值,第 i 个节点的占比。

$$y_{\delta i} = \frac{R_{\delta i} - \min(R_{\delta i})}{\max(R_{\delta i}) - \min(R_{\delta i})} \quad (12)$$

式中: $y_{\delta i}$ 代表第 i 个节点受到攻击后,第 δ 个特征值的归一化值, $R_{\delta i}$ 为归一化前的值, N 为网络中节点数。

1.4 攻击模拟策略

在都市圈MTN中,自然灾害、设备故障、人为事故等突发扰动事件都有可能节点失效、网络瘫痪。为了充分模拟MTN可能遭受到的意外情况,选择2种交通网络攻击策略,分别为随机攻击和蓄意攻击。其中随机攻击为网络节点随机发生故障,通常用来模拟自然灾害或意外事故,如暴雨洪涝、设备故障等事件。蓄意攻击则代表人为蓄意破坏,为有针对性、有目的地选择攻击对象,比如选择某种属性较高的节点进行优先攻击,通常基于度值、中介中心性进行排序选择。

此外,为便于模拟MTN遭受突发事件攻击的意外情况,对攻击策略做出如下假设:

- (1) MTN中所有节点和边遭受攻击后便失效。
- (2) MTN中的节点遭受攻击,节点和相连所有边均失效。
- (3) 当MTN某一节点遭受攻击时,只影响该节点的运作,不影响网络中其他节点的运作,比如某地铁站因为暴雨封闭,乘客无法进出站,但是不影响该地铁站所在线路跨站运输。

2 长株潭都市圈MTN模型构建

2.1 长株潭都市圈MTN概况

长株潭都市圈为中部崛起核心引擎,由长沙市、株洲市(不包括攸县、茶陵和炎陵)和湘潭市(不包括湘乡)组成的紧密联系城市群。目前已经初步形成MTN格局,包括高速铁路、城际铁路、地铁和城际汽车客运网络。

考虑到长株潭都市圈MTN提供城市间城际出行服务,选取长株潭都市圈的地铁站、火车站、二级以上汽车客运站为研究对象。各站点经纬度信息从高德地图^②查询获得,城际铁路、高速铁路、普通铁路运行班次数据从中国铁路12306^③获取,都市圈内城市客运站的运行班次数据从携程旅行^④和湘约出行^⑤获取。基于上述数据,采用1.2节的建模方法,建立都市圈MTN的复杂网络模型,其基本结构特征如表1所示。长株潭都市圈MTN模型由212个节点、2 462条边构成。

2.2 长株潭都市圈MTN节点分析

基于复杂网络理论,分别对长株潭都市圈MTN节点的度值和中介中心性进行计算,度值分布情况如图2所示,地铁网络和城际铁路的节点度值比其他3种模式高。这说明在都市圈MTN中的运输网络主体是城际铁路网络和地铁网络,高铁站和普铁站的重要性主要在更高能级的区域联系。节点介数分布情况如图3所示,在长株潭都市圈MTN中,5种模式网络的节点介数小于0.01的占比最高,各模式均超过60%。节点介数值超过0.05的节点集中在地铁—地铁换乘站和地铁—城际铁路换乘站,说明换乘站是都市圈

表1 长株潭都市圈MTN基本结构特征

Tab.1 Basic structural characteristics of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region MTN

主要指标	高速铁路网络	普通铁路网络	城际铁路网络	地铁网络	城际客运网络	都市圈MTN
节点数/个	7	5	25	161	14	212
连边数/条	10	6	264	2 109	25	2 462
最大节点度	8	8	29	36	8	36
平均节点度	4.6	5.0	21.8	26.4	4.9	23.2
平均节点介数	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
最大节点介数	0.04	0.02	0.10	0.10	0.020	0.10
网络聚类系数	0.71	0.60	0.94	0.94	0.30	0.88

资料来源:笔者自制。

注释: ② <https://lbs.amap.com/api/>。
 ③ <https://www.12306.cn/index/>。
 ④ <https://www.ctrip.com/>。
 ⑤ <https://www.lx96228.com/>。

MTN中非常重要的枢纽,同时也是最脆弱的部分,一旦瘫痪,可能会对整体网络运行造成较大影响。

3 长株潭都市圈MTN韧性分析

3.1 多情景下的都市圈MTN韧性测试

3.1.1 单个节点失效对多模式网络韧性的影响

依次对单个节点进行攻击,得到长株潭都市圈MTN中单个节点失效后的各个指标值。根据公式(9) — (12) 计算吸收能力、连通能力和恢复能力的权重分别为0.04、0.57、0.39,表明3大特征中,连通能力对都市圈MTN的综合韧性影响最大。

对各方面指标值进行排序,选出最小的前10个节点,判断为节点遭受攻击后,对MTN影响最大的节点(见表2)。可知,77号(长沙火车站)节点失效后,对长株潭MTN影响最大。其主要原因是长沙火车站为普通铁路、城际铁路、地铁、客运等多种方式换乘站,一旦失效,对网络性能影响最大。

3.1.2 随机攻击情景下多处节点失效对MTN韧性的影响

在随机攻击情景设定下,从图4所示韧性综合测度值的动态变化态势可知,当长株潭都市圈MTN失效节点数量小于40时,综合韧性指标R与失效节点数量呈线性关系,每损失一个节点,MTN的综合韧性指标损失约1.17%,当失效节点数量为43个时,综合韧性指标R为0.50,此后随着失效节点数量上升,综合韧性

损失速率放缓,当失效节点数量超过100个以后,综合韧性水平仅有正常水平的10%。这一现象表明,个位数的节点失效对长株潭MTN性能影响不大,但是如果节点失效数量显著增长,MTN综合韧性将显著降低。因此,长株潭都市圈MTN尤其需要注意自然灾害、事故故障的风险预防措施,避免多节点失效情况的发生,以保障长株潭都市圈MTN在极端情况下仍能实现基本的交通功能。

3.1.3 蓄意攻击情景下的多处节点失效对MTN韧性的影响

在基于度值和节点中心性的蓄意攻击情景下,与随机攻击情景下对网络韧性和连通性的影响有明显差异。

(1) 基于度值的蓄意攻击情景。基于度值的攻击情景下,由于度值的计算公式,首先

失效的是地铁网络长距离运营线路的节点,如长沙地铁6号线和地铁3号线。由图5可见,与随机攻击情况不同,在节点失效数量超过6个时,网络的综合韧性即出现了大幅度衰减,综合韧性指标R为0.63。当失效节点数量超过11个时,综合韧性指标R已不足正常状态的0.4,但此后直到节点损失数量超过67个时,综合韧性指标R才进一步下降。总体来看,长株潭都市圈MTN在面对基于度值的蓄意攻击时,在攻击的初期表现较为脆弱,系统性能衰减较随机攻击时更快。因此在长株潭MTN日常运营中,需要格外防范基于度值的意外攻击,对于MTN中的长距离运行线路的站点需要重点关注。

(2) 基于中介中心性的蓄意攻击情景。在基于中介中心性的蓄意攻击情景设定下,

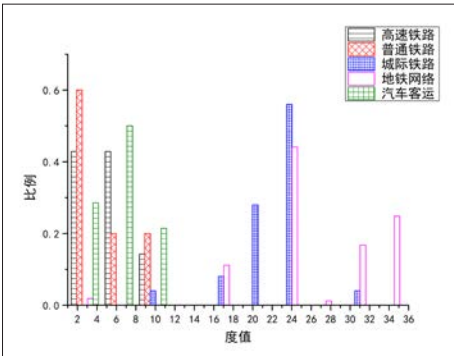


图2 长株潭都市圈MTN节点度值分布示意图
Fig.2 The distribution of node degree values of the MTN in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region

资料来源:笔者自绘。

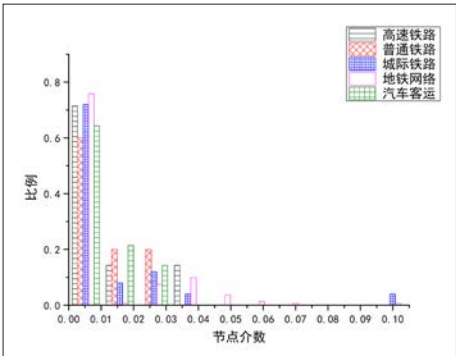


图3 长株潭都市圈MTN节点介数分布示意图
Fig.3 The distribution of node betweenness centrality of the MTN in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region

资料来源:笔者自绘。

表2 基于评价指标的站点关键性排序
Tab.2 Criticality ranking based on different node evaluation

排序	综合韧性	吸收能力	连通能力	恢复能力
1	77	77	33	2
2	33	14	59	201
3	59	78	77	200
4	178	178	176	202
5	183	183	177	37
6	184	82	178	38
7	78	55	180	210
8	177	184	183	10
9	82	115	184	3
10	84	50	71	205

资料来源:笔者自制。

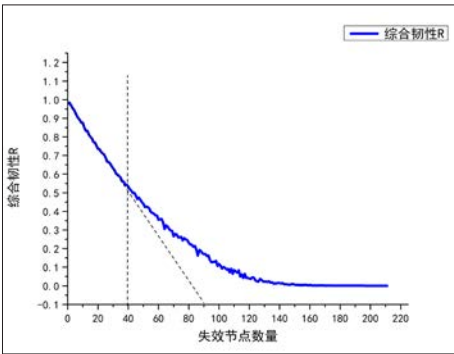


图4 随机攻击下综合韧性变化示意图
Fig.4 The changes in comprehensive resilience under random attacks

资料来源:笔者自绘。

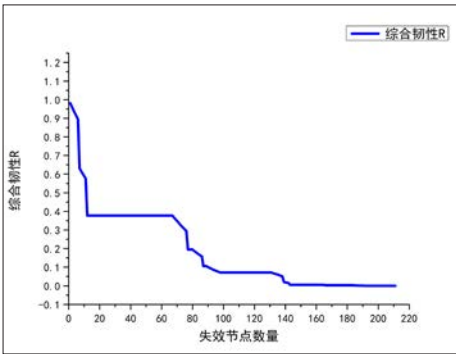


图5 基于度值的蓄意攻击下综合韧性变化示意图
Fig.5 The changes in comprehensive resilience under ranking-based attacks according to node degree values

资料来源:笔者自绘。

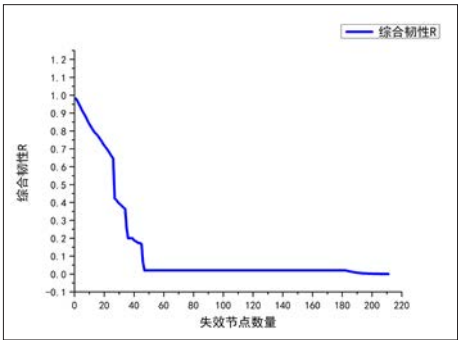


图6 基于中介中心性的蓄意攻击下综合韧性变化示意
Fig.6 The changes in comprehensive resilience under ranking-based attacks according to node betweenness centrality

资料来源:笔者自绘。

长株潭都市圈MTN中率先失效的节点为地铁网络与城际网络中的换乘节点。由图6可见,长株潭都市圈 MTN 在应对基于中介中心性蓄意攻击时,呈现出极为脆弱的特性。当失效节点数量超过35个时,网络的综合韧性指标R迅速下降至 0.20 以下。该测试结果表明,长株潭都市圈 MTN 在面对中介中心性攻击时,网络韧性存在明显不足,需要制定有效策略提升交通网络在该特定攻击情景下的韧性,增强长株潭都市圈 MTN 在复杂风险环境中的稳定性与可靠性。

3.2 基于韧性测度的长株潭都市圈MTN提升策略

3.2.1 韧性测度分析

随机攻击与蓄意攻击分别代表了都市圈MTN中两种可能的交通突发中断风险,解析MTN的韧性变化对提升长株潭都市圈MTN的韧性和服务水平具有重要意义。由图7可见,长株潭都市圈MTN的韧性指标主要受吸收能力和连通能力的影响较大,恢复能力在多种攻击情景下性能损失没有明显区别。其中,在节点数量损失较少的初期阶段受基于度值的蓄意攻击影响较大,当受损节点数量增加超过33个以后,则是在基于中介中心性蓄意攻击下更为脆弱。因此,在长株潭都市圈MTN优化中,需要优先考虑对联通能力和吸收能力的提升,此外需要研究针对基于度值攻击的预防措施和基

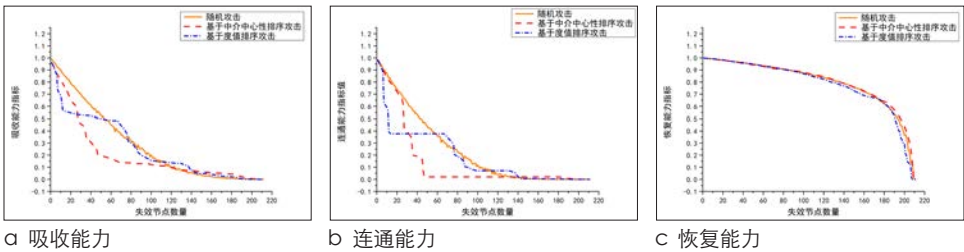


图7 多种攻击情景下长株潭都市圈MTN的不同维度韧性指标变化示意
Fig.7 The changes in resilience of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolitan Region MTN under multiple attack scenarios

资料来源:笔者自绘。

于中介中心性节点攻击的紧急预案措施。

3.2.2 基于韧性的网络优化策略

基于前述韧性测度结果,从在都市圈层面应对和防范可能造成MTN瘫痪的系统风险的角度出发,提出以下优化策略。

(1) 优化换乘节点布局。从前述长株潭都市圈MTN节点中介度分布可以看出,长株潭都市圈的高中介度节点主要集中分布在地铁—地铁换乘站和地铁—城际铁路换乘站,位于长沙市核心城区。为了强化长株潭都市圈MTN在面向中介中心性攻击下的韧性,应当布局新的地铁和城际铁路线路,分散关键节点的客流压力。例如在长株潭都市圈核心区范围内规划建设地铁环线或城际铁路支线,增加网络内换乘站点的数量,将客流引导到其他换乘站,减轻关键节点如五一广场、六沟垅等站点的客流负担,提高整体网络的韧性。

(2) 优化交通网络分布。根据MTN度值分布情况,长株潭都市圈MTN应当重点关注全域的城际铁路网络和地铁网络建设。为提高MTN韧性,建议合理规划都市圈城际铁路和地铁的线路和节点的分布,避免建设过度集中在少数区域。在长株潭地区的其他重要城镇和产业园区,适当增加网络节点,加强长株潭三市之间,及其与周边地区的交通联系,构建更加紧密的交通网络,提高网络的整体连通性和韧性。

(3) 加强关键节点保护。在多情景的攻击模式比较分析中,发现长株潭都市圈多模式网络在少量节点失效时,面对基于度值的蓄意攻击时表现得较为脆弱,建议强化高度值节点的安全防护措施,增加安保人员配备,对进站人员和物品进行严格检查,防止危险物品进入

换乘站。此外,MTN在受损节点数量增加超过33个以后,面对中介中心性的蓄意攻击时表现得更为脆弱。因此建议对五一广场、六沟垅、文昌阁等高中介中心性地铁换乘站制定针对关键换乘站的详细应急预案,包括火灾、内涝等各类突发事件的应对措施。明确在紧急情况下的人员疏散路线、救援力量调配、物资供应等方案,并定期进行演练和修订。

(4) 增加备用线路。在长株潭都市圈MTN的韧性测试中,可以发现随着节点失效比例增加,长株潭都市圈MTN的连通性快速下降,即随着节点失效,MTN的服务范围显著下降、局部服务范围缩小。因此建议对于连接重要区域比如行政中心、商业中心、核心居住组团等的交通线路,建设一些平行的快速通道,当主要线路出现问题时,备用线路可以及时分流交通流量。

4 结语

长株潭都市圈作为中部地区首个国家级都市圈,在区域发展中占据重要地位。本文聚焦于长株潭都市圈韧性测度与优化策略,从多个维度构建韧性测度指标体系。通过计算综合韧性值,结果显示,随机攻击情景下,长株潭都市圈整体韧性较好,随着节点失效数量增加,韧性呈线性下降趋势。但是受蓄意攻击的影响较大,需要加强整体网络应对基于度值和中介中心性攻击的能力。后续研究可在以下方面拓展:一是深化韧性动态评估,考虑不同发展阶段与外部环境变化对都市圈韧性的影响;二是加强对韧性提升微观机制的研究,深入剖析各策略在具体实施过程中的作用路径与效果;三

是开展国际比较研究,借鉴国外成熟都市圈韧性建设经验,为长株潭都市圈MTN的高质量发展提供更丰富的参考。

参考文献 References

[1] 张伟. 都市圈的概念、特征及其规划探讨[J]. 城市规划, 2003, 27 (6): 47-50.
ZHANG Wei. The basic concept, characteristics and planning of metropolitan regions in Jiangsu[J]. City Planning Review, 2003, 27(6): 47-50.

[2] 陈小鸿,周翔,乔瑛瑶. 多层次轨道交通网络与多尺度空间协同优化——以上海都市圈为例[J]. 城市交通, 2017, 15 (1): 20-30.
CHEN Xiaohong, ZHOU Xiang, QIAO Yingyao. Coordination and optimization of multilevel rail transit network and multi-scale spatial layout: a case study of Shanghai Metropolitan Area[J]. Urban Transport of China, 2017, 15(1): 20-30.

[3] 付建飞. 交通运输一体化是构筑都市圈发展的命脉[J]. 铁道运输与经济, 2007 (5): 13-15.
FU Jianfei. Transportation integration is the lifeblood of building metropolitan region development[J]. Railway Transport and Economy, 2007(5): 13-15.

[4] 廖虹. 福州都市圈交通一体化发展对策研究[J]. 综合运输, 2024, 46 (11): 176-180.
LIAO Hong. Research on countermeasures for transportation integration development in Fuzhou Metropolitan Area[J]. China Transportation Review, 2024, 46(11): 176-180.

[5] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973(4): 1-23.

[6] BERDICA K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy, 2002, 9(2): 117-127.

[7] MATTSSON L G, JENELIUS E. Vulnerability and resilience of transport systems - a discussion of recent research[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015, 81: 16-34.

[8] MILLER-HOOKS E, ZHANG X D, FATURECHI R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks[J]. Computers and Operations Research, 2012, 39(7): 1633-1643.

[9] 郭明雪,赵婷婷,高自友. 韧性背景下道路交通网络保护和修复优化方法综述[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44 (11): 3626-3638.
GUO Mingxue, ZHAO Tingting, GAO Ziyou. Review of optimization methodologies for road transportation network protection and restoration to enhance system resilience[J]. Systems Engineering

— Theory & Practice, 2024, 44(11): 3626-3638.

[10] 张洁斐,任刚,马景峰,等. 基于韧性评估的地铁网络修复时序决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20 (4): 14-20.
ZHANG Jiefei, REN Gang, MA Jingfeng, et al. Decision-making method of repair sequence for metro network based on resilience evaluation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(4): 14-20.

[11] 黄莺,刘梦茹,魏晋果,等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学, 2021, 36 (1): 32-36.
HUANG Ying, LIU Mengru, WEI Jinguo, et al. Research on urban metro network recovery strategy based on resilience curve[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 32-36.

[12] 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.

[13] 李洁,刘邱瑛,张欣宇,等. 基于组合赋权—云模型的高速公路网交通韧性评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50 (11): 224-234.
LI Jie, LIU Qiuqi, ZHANG Xinyu, et al. Evaluation of traffic resilience of expressway network based on combined weighting-cloud model[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(11): 224-234.

[14] 路庆昌,王润东,徐鹏程,等. 基于网络耦合特性的地铁网络韧性评估方法[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版), 1-12 (2025-03-18) [2025-06-16]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.21.014>.
LU Qingchang, WANG Rundong, XU Pengcheng, et al. Metro network resilience assessment method based on network coupling characteristics[J/OL]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1-12 (2025-03-18) [2025-06-16]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.21.014>.

[15] 化星琳,彭翀,张梦洁. 长江经济带都市圈公路网络韧性特征分异研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32 (10): 2006-2017.
HUA Xinglin, PENG Chong, ZHANG Mengjie. Differentiation of resilience characteristics of highway networks in metropolitan areas of Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(10): 2006-2017.

[16] 彭翀,陈思宇,王宝强. 中断模拟下城市群网络结构韧性研究:以长江中游城市群客运网络为例[J]. 经济地理, 2019, 39 (8): 68-76.
PENG Chong, CHEN Siyu, WANG Baoqiang. Analyzing city network's structural resilience under disruption scenarios: a case study of passenger transport network in the Middle Reaches of Yangtze

River[J]. Economic Geography, 2019, 39(8): 68-76.

[17] 赵成勇,马飞,崔睿颖,等. 都市圈多模式交通网络建模及集成韧性测度研究[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版), 1-15 (2025-03-17) [2025-06-16]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.27.021>.
ZHAO Chengyong, MA Fei, CUI Ruiying, et al. Metropolitan area multimodal transportation network modeling and integrated resilience measurement[J/OL]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1-15 (2025-03-17) [2025-06-16]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.27.021>.

[18] 马书红,武亚俊,陈西芳. 城市群多模式交通网络结构韧性分析——以关中平原城市群为例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62 (7): 1228-1235.
MA Shuhong, WU Yajun, CHEN Xifang. Structural resilience analysis of multimodal transportation networks in urban agglomerations: a case study of Guanzhong Plain Urban Agglomeration[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(7): 1228-1235.

[19] 鞠艳妮,刘旭,韩珣,等. 城市群多模式交通系统空间网络韧性评估[J]. 安全与环境学报, 2025, 25 (6): 2341-2350.
JU Yanni, LIU Xu, HAN Xun, et al. Resilience evaluation of spatial network in urban agglomeration multi-mode transportation system[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(6): 2341-2350.

[20] 王永岗,王龙健,余丽洁,等. 多模式交通网络的耦合脆弱性评估方法:以云南省为例[J]. 系统工程, 2025, 43 (3): 103-112.
WANG Yonggang, WANG Longjian, YU Lijie, et al. A coupled vulnerability assessment method for multi-modal transportation networks: a case study of Yunnan, China[J]. Systems Engineering, 2025, 43(3): 103-112.

[21] 马飞,苟慧艳,杨梦楠,等. 考虑灰色攻击的多制式区域轨道交通网络韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33 (12): 148-159.
MA Fei, GOU Huiyan, YANG Mengnan, et al. Resilience assessment of multi-modal regional rail transit networks considering grey attack[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 148-159.

[22] FERBER C V, HOLOVATCH T, HOLOVATCH Y, et al. Public transport networks: empirical analysis and modeling[J]. The European Physical Journal B, 2009, 68(2): 261-275.

[23] NAN C, SANSVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35-53.

[24] SHINOZUKA M, CHANG S E, CHENG T C, et al. Resilience of integrated power and water systems[J]. Seismic Evaluation and Retrofit of Lifeline Systems, 2003, 1: 65-86.