

# 基于级联失效模型的山东高速公路网络韧性研究

尚大桐<sup>1</sup>, 黄玉娟<sup>1</sup>, 尚延波<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省日照市建筑工程施工图审查中心, 山东 日照

收稿日期: 2025年11月6日; 录用日期: 2026年1月4日; 发布日期: 2026年1月15日

## 摘要

高速公路作为国家关键基础设施, 对突发事件下的交通网络韧性保障至关重要。针对传统的节点重要性评估和级联失效模型的局限, 本研究采用TOPSIS多属性决策方法, 融合度值、介数、中心性及实际交通流量以构建高速公路节点重要度评价体系, 并以此为基础定义节点初始负载, 建立考虑节点重要度的负载重分配的“负载-容量”级联失效模型, 并以山东省高速公路网为例进行实证分析。研究结果表明: (1) 考虑负载重分配的级联失效过程会显著加剧网络的脆弱性; (2) 网络对蓄意攻击高度敏感, 其中基于介数的攻击策略破坏性尤为突出, 揭示了综合评价指标在识别特定脆弱性时可能存在“稀释效应”; (3) 将实际流量纳入节点重要性评估, 能更真实地反映网络功能关键点; 提升网络的容量冗余参数( $\alpha, \beta$ )能有效增强其整体韧性。本研究为高速公路网络的风险评估、脆弱性识别及韧性提升策略提供了新的理论视角和科学依据。

## 关键词

复杂网络, 高速公路网络, 韧性, 级联失效模型

# Research on Resilience of Shandong Expressway Network Based on Cascading Failure Model

Datong Shang<sup>1</sup>, Yujuan Huang<sup>1</sup>, Yanbo Shang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Rizhao Construction Engineering Construction Drawing Review Center of Shandong Province, Rizhao Shandong

Received: November 6, 2025; accepted: January 4, 2026; published: January 15, 2026

## Abstract

As a critical national infrastructure, expressway networks play a vital role in ensuring the resilience of transportation networks during emergencies. To address the limitations of traditional node importance evaluation methods and cascading failure models, this study adopts the TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) multi-attribute decision-making approach. It integrates degree centrality, betweenness centrality, closeness centrality, and actual traffic flow to construct an evaluation system for the importance of expressway network nodes. Based on this system, the initial load of nodes is defined, and a “load-capacity” cascading failure model that considers node importance in load redistribution is established. An empirical analysis is conducted using the expressway network of Shandong Province as a case study. The results show that: (1) The cascading failure process with load redistribution significantly increases the vulnerability of the network; (2) The network is highly sensitive to intentional attacks, among which the attack strategy based on betweenness centrality is particularly destructive, revealing that comprehensive evaluation indicators may have a “dilution effect” when identifying specific vulnerabilities; (3) Incorporating actual traffic flow into node importance evaluation can more truly reflect the functional key nodes of the network; improving the network’s capacity redundancy parameters ( $\alpha, \beta$ ) can effectively enhance its overall resilience. This study provides a new theoretical perspective and scientific basis for risk assessment, vulnerability identification, and resilience improvement strategies of expressway networks.

## Keywords

Complex Networks, Expressway Networks, Resilience, Cascading Failure Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高速公路网络是国家关键基础设施和国民经济大动脉，其安全高效运行对区域经济、社会运转及应急响应至关重要。随着路网规模扩大与结构复杂化，其在自然灾害、事故、故障或攻击等突发事件下的脆弱性日益凸显。这些局部扰动易通过网络拓扑与功能耦合引发破坏性级联失效，导致交通负载灾难性重分配，引发大范围拥堵瘫痪，严重削弱网络韧性。基于复杂网络理论的交通韧性研究已成热点，学者们常用其刻画拓扑特性并结合“负载-容量”模型模拟失效过程。

国内外学者主要从复杂网络理论、网络韧性评估与提升、级联失效机制等方面开展了研究，吴建军构建拓扑框架，揭示关键节点对连通性的作用[1]。Watts 和 Strogatz 提出小世界模型，阐明网络局部紧密与长距短路径特性[2]。Albert-László Barabási 等提出无标度模型，明确枢纽节点对结构稳定的关键意义[3]。杨琦等梳理该理论在公共交通韧性领域的发展，提出多源数据融合方向[4]。高自友和吴建军分析网络拓扑与流量承载关联，为规划提供依据[5]。在网络韧性评估与提升方面，高鹏等提出变权重法，将客流量动态纳入评估[6]。Zhang D M 等以上海地铁为例，建立多维度评估体系[7]。吴建军和李树彬从出行行为视角探究对韧性的影响[8]。Azolin G L 等将公共交通纳入评估，实现多维度系统评估[9]。Gonçalves L 等明确城市交通韧性概念，提出多学科框架[10]。Lordan O 等通过拓扑模型，分析网络连接对鲁棒性的

影响[11]。ZHU W 等提出战略防御策略, 提升地铁网络鲁棒性[12]。Li T 等结合运营数据, 构建高铁网络鲁棒性评估方法[13]。Dunn S 等用图论提升航空网络韧性, 对道路网络有参考价值[14]。在级联失效机制研究方面 Motter A E 等建立经典级联失效模型, 揭示故障连锁机制[15]。张渡清等综述级联失效研究, 总结防控策略[16]。Skanda V 等构建分析框架, 模拟大规模攻击下级联过程[17]。Aydin N Y 等结合压力测试与图论, 提出地震下优化策略[18]。周琴等的动态模型为复杂场景研究提供思路[19]。

现有研究虽成果丰富, 但仍存在明显局限: 一是研究对象集中于城市内部道路网, 高速公路网络层面的韧性研究明显不足; 二是节点攻击研究多依赖单一指标, 难以真实模拟复杂多变的现实干扰场景, 无法全面反映网络脆弱性与韧性。本文聚焦山东省高速公路网, 旨在构建更贴近现实的韧性评估框架。摒弃仅依赖拓扑结构评价节点重要性, 开创性引入收费站实际日均车流量数据, 结合度、介数、接近中心性与特征向量中心性四大拓扑指标, 针对 169 对服务区和 500 多个收费站点, 利用 TOPSIS 多属性决策方法构建综合节点重要度评价体系。基于此, 将节点初始负载与其综合重要度关联, 并建立非线性“负载-容量”级联失效模型。通过模拟随机攻击与基于综合重要度的蓄意攻击下网络失效过程, 本文深入探究: 不同攻击策略对网络韧性的影响差异; 考虑流量的重要性排序能否更准确识别核心脆弱点; 容量参数变化如何影响级联失效演化及整体韧性。研究为山东及全国高速网的风险预警、结构优化和应急管理提供更精准有效的科学依据。

## 2. 级联失效模型

本研究旨在构建一个适用于山东高速公路网络的级联失效模型, 其核心在于对网络中节点(收费站)的初始负载、承载容量以及失效后负载如何重新分配的机制进行合理设定与优化。通过此模型, 后续将能对不同参数配置及攻击策略下网络的韧性进行量化分析。

### 2.1. 节点负载与容量的界定

在级联失效的动力学过程中, 每个网络节点的状态由其当前的负载和其最大能承受的容量共同决定。准确定义这两个参数是模型有效性的基石。

#### 2.1.1. 节点容量模型

以 Motter 与 Lai (2002) 开创性的 ML 模型和 Kim 和 Motter 等人提出的非线性模型为基础, 考虑在实际高速公路网络中, 部分容量较小的节点可能保有较大裕度, 而设计容量大的节点反而可能因高负荷运行而剩余容量有限。鉴于此, 本研究认为采用非线性容量模型更能贴近真实情况。具体而言, 本文选用如下形式的非线性容量-负载关系模型:

$$C_i = (1 + \beta) \cdot (L_i^0)^\alpha \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

其中  $C_i$  为节点容量,  $\alpha$  和  $\beta$  都为容量参数,  $\alpha \geq 0$ ,  $\beta \geq 0$ 。 $L_i^0$  为节点初始负载。

#### 2.1.2. 节点初始负载确定

在交通网络分析中, 度值(衡量一个节点直接连接的高速公路数量)、介数(衡量一个节点位于网络中其他节点间最短路径上的频率)、接近中心性(衡量一个节点到网络中所有其他节点的平均(最短)距离的便利程度)和特征向量中心性(衡量一个节点自身的重要性以及与其连接的邻居节点的重要性)是四个核心的网络指标, 它们共同描绘了网络中节点的重要性和角色。本文引入 TOPSIS 算法来重新衡量网络节点的重要性。在高速公路网络研究中, 收费站统计的流量作为重要因素往往能体现出更贴近现实的道路和收费站运行情况, 本文将处理 2022 年山东高速公路网数据统计出的 544 个收费站节点的连接情况, 流量, 和节点的度、介数、接近中心性和特征向量中心性一起作为衡量节点重要性的指标。在这四个因素的基

基础上确定全新的节点重要度顺序，然后将节点的重要度作为节点的初始负载  $L_i^0$ 。

TOPSIS 是一种常用的多属性决策方法，其核心思想是根据各个节点的属性与理想解(最优解)和负理想解(最差解)的相似度来排序。它计算节点到理想解和负理想解的距离，并通过这两者的距离来判断节点的重要度。

因流量属性的值较其他四个属性的值来说要大，为避免过大的值使其对最终重要度的计算影响过大，需要将所有属性的值标准化，使每个属性的数值在同一范围内，并将标准化后的属性值乘以相应的权重，再使用欧几里得距离来计算每个节点与理想解和负理想解之间的距离：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - X_j^+)^2} \quad (2)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - X_j^-)^2} \quad (3)$$

其中， $X_j^+$  和  $X_j^-$  分别是节点的度、介数、接近中心性、特征向量中心性、流量这五个属性第  $j$  个属性的理想解和负理想解  $j=1, 2, 3, 4, 5$ 。 $X_{ij}$  为第  $i$  个收费站节点的第  $j$  个属性。 $X_j^+$  为理想解是对于每个属性，选择所有节点中最优的(最大或最小)值。 $X_j^-$  负理想解是对于每个属性，选择所有节点中最差的(最大或最小)值。

计算相对接近度：

$$E_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (4)$$

其中  $E_i$  是第  $i$  个节点的相对接近度，将其作为节点的重要度。

## 2.2. 传统重分配策略的局限与优化的重分配策略

早期的负载重分配策略较为简单，例如将失效节点的负载平均分配给所有邻居，或依据邻居节点的度值按比例分配。负载重分配发生在高速网络中的节点失效后，会将自身的流量负载按照某种分配策略重新分配给自己的邻接节点，以保证人员货物的正常运送。现有研究通常使用较为简单的分配策略，如平均分配、度值分配和距离分配等策略，度值分配策略如公式(7)所示。其中： $K_j$  为节点  $i$  的邻居节点  $j$  的度值， $\sum_{m \in \Gamma_i}$  表示节点  $i$  的邻居节点的集合， $L_j$  为邻居节点  $j$  此刻的总负载。这些策略未能充分考虑邻居节点的实时状态或其实际承载潜力，可能导致负载不均，加速网络崩溃。

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_{ji} &= L_i^0 \times \frac{K_j}{\sum_{m \in \Gamma_i} K_m} \\ L_j^1 &= \Delta L_{ji} + L_j^0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在高速网络环境中，连接线路和收费节点可能因为各种因素导致失效，而失效节点的流量负载需要根据特定的分配机制转移给其邻近节点。然而，现有的分配方法，如平均分配和度值分配，都存在不足之处。所以本文需要选取一种更适合于高速交通网络的网络重分配策略。将前文中得到的高速公路网络节点重要度作为节点负载的量化指标。根据重要度的比例对是失效节点的负载进行重分配，有效避免了平均分配或考虑单一因素的分配策略带来的不准确性，尽可能地在分配之后提高整个网络的韧性，减少分配后再发生节点因容量不足而失效的情况发生，当网络中的节点  $i$  发生失效时，将该节点的负载与相邻节点  $j$  的负载占所有相邻节点负载比例的乘积作为额外的负载重新分配给相邻节点  $j$ ，因此，相邻节点  $j$  所得到的负载如公式(8)所示：

$$\Delta L_{i \rightarrow j} = L_i^1 \times \frac{L_j^0}{\sum_{m \in \Gamma_i} L_m^0} \quad (6)$$

其中,  $L_i^1$  为节点  $i$  的实时负载, 当节点  $i$  为第一个失效节点时, 则  $L_i^1 = L_i^0$ ,  $\Gamma_i$  表示节点  $i$  的相邻节点的集合。

当网络中某个节点失效后, 该节点的负载会按照负载重分配策略分配给相邻的节点, 而当相邻节点接收到额外负载之后若负载总和也超出了该节点容量的范围, 则继续将该节点的负载分配给其相邻的除分配给这个节点负载的其他节点, 再进行以上的判断直到没有节点失效或网络完全崩溃, 这就是级联失效的过程, 其传播机理如公式(9)所示, 当式①成立时, 节点  $j$  的负载未超过其最大容量, 则级联失效结束。当式②成立时, 节点  $j$  的负载超过了其最大容量, 则节点  $j$  将失效, 节点  $j$  的负载又将按比例分配给它的相邻节点, 如此往复循环, 直到整个网络崩溃或没有节点失效时结束。

$$\left. \begin{array}{l} L_j^1 = \Delta L_{i \rightarrow j} + L_j^0 < C_j \text{ ①} \\ L_j^1 = \Delta L_{i \rightarrow j} + L_j^0 > C_j \text{ ②} \end{array} \right\} \quad (7)$$

### 3. 级联失效模型构建

#### 3.1. 级联失效模型及仿真流程

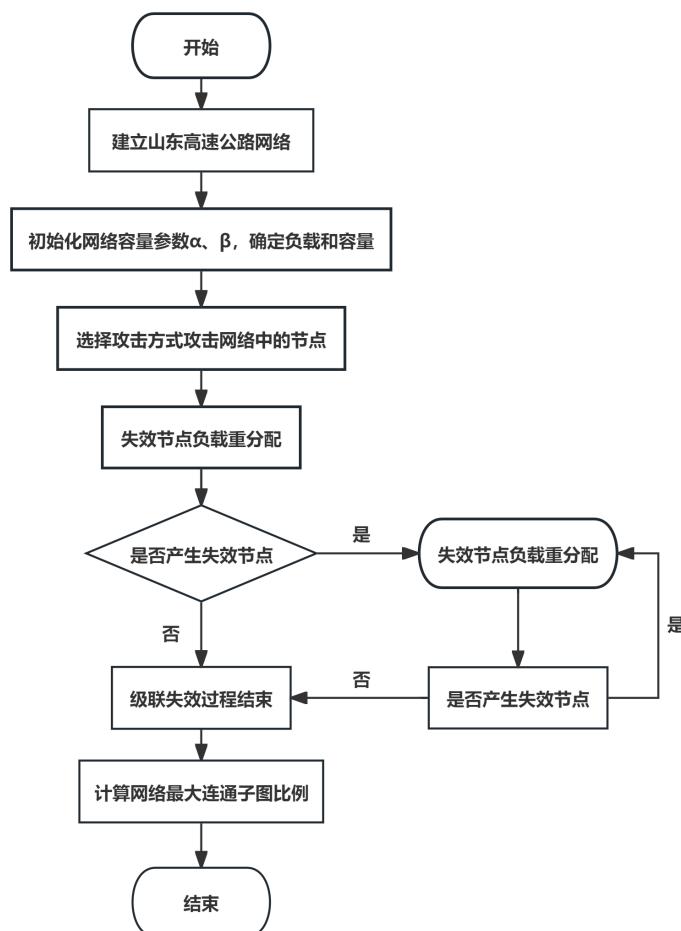


Figure 1. Flow chart of highway network cascading failure

图 1. 高速公路网络级联失效流程图

根据山东高速公路网络的级联失效模型设计仿真算法如下：

步骤 1：构建山东高速公路网络。

步骤 2：初始化网络的容量参数  $\alpha$ 、 $\beta$ ，按照上述 2.2.1 节 2) 中优化后的算法确定节点初始负载  $L_i^0$  和最大容量  $C_i$ 。

步骤 3 选择攻击方式攻击网络中的节点，将被攻击的节点定义为失效。

步骤 4：将是失效节点的负载按照上述 1.2.2 中改进后的分配策略重新分配给其相邻节点，判断其相邻节点的负载是否超过自身的最大容量，如果没有，则级联失效过程结束，转步骤 5，若有节点的负载超过自身最大容量，则判断该节点也失效，级联失效过程继续，重复步骤 4。

步骤 5：级联失效过程结束，更新网络状态，计算网络最大连通子图比例。

其仿真流程如图 1 所示。

### 3.2. 网络韧性衡量指标

含有节点数量最多的子网络被称为最大连通子图。

当高速公路网络的节点或边受到攻击失效后，网络可能会分裂成若干子网络。最大连通子图中节点数量和规模一般反映了高速公路网络的稳定性以及抵抗攻击或干扰的能力。最大连通子图的相对大小  $G$  可以用以下公式表示：

$$G = \frac{M'}{M} \quad (8)$$

式中：  $G$  表示最大连通子图的相对大小；  $M'$  表示干扰后最大连通子图的节点数；  $M$  表示干扰前最大连通子图的节点数。

如果  $G$  值越大，说明最大连通子图的规模越大，连通的节点数量越多，高速路网的韧性越强，对攻击或干扰的抵抗力越强。因此，通过计算  $G$  值，我们可以评估高速路网在受到干扰后的韧性和抵抗力，也可表示高速公路网络的韧性。

### 3.3. 高速公路网络攻击策略

对于节点仿真失效策略本文选取随机攻击策略和蓄意攻击策略两种攻击类型，失效方法均为基于删除法的攻击策略。

随机攻击策略指随机选择网络中的节点进行攻击，网络中的节点被攻击的概率是一致的，这种攻击策略有效模拟了因随机事件如自然原因等因素导致的节点失效的情况，反应在随机情况下节点和网络的表现，用来评估网络的韧性。

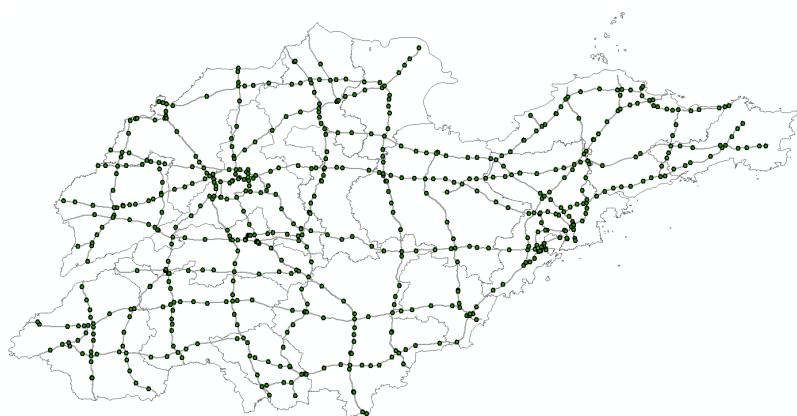
蓄意攻击则根据网络中节点某一参数(如节点的度值、介数、流量、重要度)的大小排序来选取节点进行有针对性的攻击。

本文分别采取这两种攻击方式对网络进行攻击，研究山东高速网络在不同情况下的韧性。

## 4. 实例分析

### 4.1. 山东地区高速公路网构建

本文以 2022 年山东省高速公路网为例进行示例分析，通过爬取高德地图和山东交通出行服务网获取高速公路收费站点数据，采用 Space-L 建模方法建立高速公路网络拓扑结构，包括 544 个高速公路收费站、751 条边，山东省高速公路实时路况信息，得到山东高速公路网络拓扑图见图 2。



**Figure 2.** Topology diagram of Shandong Province's expressway network  
**图 2.** 山东高速公路网络拓扑图

#### 4.2. 山东高速公路网络特性分析

将山东高速公路网络数据导入 python 计算其特性，并取各特性中最大的十五个节点进行降序排列，如表 1 所示。

**Table 1.** Shandong expressway network characteristics comparison table  
**表 1.** 山东高速网络特性对比表

排名	编号	度值	编号	介数	编号	中心度	编号	特征度	编号	流量
1	费县	6	沂南	21.1557%	沂水北	5.5956%	东平	42.2579%	青岛东	80144
2	聊城南	6	高里	21.1368%	沂山	5.5729%	梁山	42.2327%	海湾大桥	53050
3	潍日潍城	6	沂水北	20.9790%	诸葛	5.5689%	东平南	41.3670%	福山	51209
4	夏津西	6	沂水	20.8997%	青兰杨庄	5.5597%	彭集	41.3088%	济南	49212
5	邱家店	6	沂水南	20.8703%	沂水	5.5305%	梁山北	41.1341%	济南北	48105
6	夏庄	5	沂南北	20.8558%	莱芜枢纽	5.5202%	平阴南	15.5255%	郭店	46770
7	烟台机场	5	沂南东	20.8507%	沂水南	5.5055%	嘉祥西	15.3924%	李村	46600
8	泰安东	5	诸城枢纽	20.6928%	沂南北	5.4926%	汶上西	10.8069%	青岛西	46259
9	古现	5	青兰杨庄	19.2795%	沂南东	5.4886%	汶上北	10.4986%	黄岛东	44745
10	梁山	5	孟疃	19.1674%	莱芜南	5.4785%	杨营	9.5735%	济南东	42390
11	东平	5	费县	19.1364%	沂南	5.4758%	平阴玫瑰	8.6161%	机场	41819
12	齐河生态城	5	诸城西	19.1068%	孟疃	5.4741%	嘉祥	8.2857%	临沂	39176
13	南村	5	诸城	18.5727%	辛庄	5.4574%	平阴	7.9172%	日照	36759
14	平阴玫瑰	5	诸城东	18.3962%	邱家店	5.4574%	平阴孔村	7.9166%	济南兴隆	35963
15	齐河	5	辛兴	18.2223%	莱芜西	5.4563%	郓城南	7.8250%	港沟	35940

收费站节点的长度。通过既得的节点度值排列分析得知，在山东高速公路网络中，费县、聊城南、潍日潍城、夏津西、邱家店这五个收费站节点的度值为 5，并列排在第一位，其次是夏庄、烟台机场等节点度值为 4，从表中可以看出，山东高速公路收费站节点的度值相差并不大，相同度值的节点数量较大，最大度值和最小度值相差只有 4，平均度值为 2.76，初步来看单纯通过度值大小的排序来确定节点重要

度是不合理的。但结合其他网络特性来看，节点度值依然是衡量网络节点重要性的一个重要指标。

通过对山东高速网络收费站节点的度值、介数、中心度和特征度的计算通过排名可以看出节点介数虽然数值跨度相对度值来讲较大但数值的分布较为均匀，由表 1 可以得到接近中心性和特征向量中心性的排序。

由表 1 可以看出，六个指标的节点排名各不相同，节点重要性排序与其他五种特性序列的排序有着明显的差异，这说明如果使用单一属性来衡量节点重要性明显存在问题。本文将节点度值、介数、接近中心性和节点的特征向量中心性以及节点的流量作为衡量节点重要性的五个因素，运用 TOPSIS 算法确定全新的节点重要性顺序，能更为准确的表达出节点的重要性，避免了以单一特性作为节点重要性指标不准确的缺点。结果如表 2 所示。由表可以看出山东高速公路网络中排名第一的是东平收费站，重要度为 52.5496%。

**Table 2.** Node importance ranking for the Shandong expressway network

**表 2.** 山东高速网络节点重要性排序

排名	编号	重要度
1	东平	52.5496%
2	梁山	51.7862%
3	彭集	49.4835%
4	东平南	47.3460%
5	梁山北	46.7296%
6	青岛东	43.5700%
7	沂水	35.0354%
8	诸城枢纽	34.6275%
9	沂南	34.6039%
10	高里	34.5983%
11	沂水北	34.3956%
12	费县	34.0792%
13	沂南东	34.0762%
14	沂水南	33.7585%
15	沂南北	33.5312%

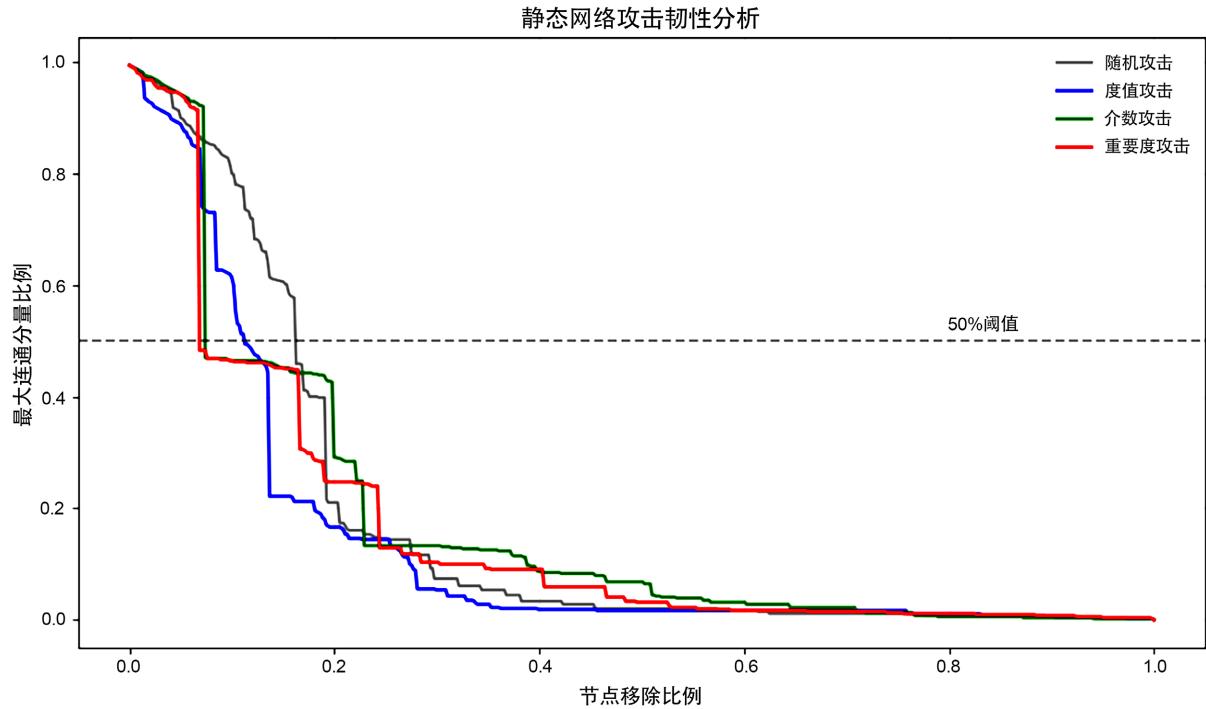
### 4.3. 韧性分析

#### 4.3.1. 不同失效方式对山东高速网络韧性的影响

图 3 是利用 python 分析了当容量参数  $\alpha = 0.3$ 、 $\beta = 0.2$  时山东高速网络在静态韧性下最大连通子图规模的变化情况。静态韧性是不考虑网络级联失效过程，仅按照选取的不同网络指标如度值、介数等大小顺序对网络的节点进行攻击使其失效，这种失效方式不考虑负载重分配这一过程。

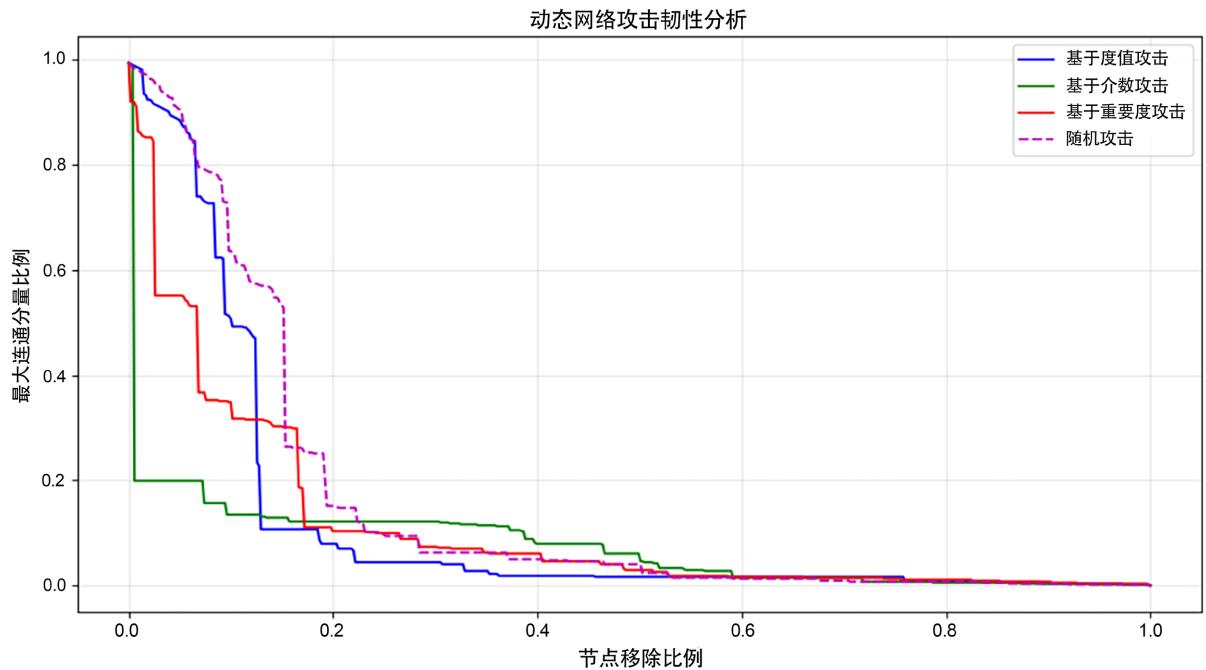
图中可以看出在静态网络中随着随机攻击方式下节点在最大连通子图比例在 50% 之前下降缓慢除随机攻击之外其他攻击方式处于相似的下降趋势，均为前期下降迅速后期下降平缓，说明在只考虑静态韧性的情况下，网络在随机攻击策略下有较强的韧性。在最大连通子图比例在 50% 之前时，蓄意攻击下的网络最大连通子图下降显著，对于网络的影响要大于随机攻击。但在静态网络下，随机攻击和蓄意攻击

的整体趋势相似，两者均在节点移除比例在 0.6 时最大连通子图比例趋近于零。



**Figure 3.** Static network resilience of the Shandong expressway network

**图 3.** 山东高速网络静态网络韧性



**Figure 4.** Dynamic network resilience of the Shandong expressway network

**图 4.** 山东高速网络动态网络韧性

图 4 是利用 python 分析了当容量参数  $\alpha = 0.3$ 、 $\beta = 0.2$  时山东高速网络在动态韧性下最大连通子图

规模的变化情况。动态韧性是在节点攻击基础上考虑级联失效故障考虑网络负载容量重分配策略之后的网络韧性，是更贴近于实际情况的网络韧性。

对比图3和图4可以明显看出山东高速网络在动态网络中的最大连通子图下降速度要明显高于静态网络，尤其是蓄意攻击中的介数顺序攻击，在删除很小一部分节点的时候介数顺序攻击表现出显著区别于其他攻击方式的迅速下降趋势，最大连通子图比例在节点攻击数量接近于0时便降低到了40%左右，而其余方式的攻击在节点移除比例在小于20%时最大连通子图比例下降速度较高，在大于20%小于60%时最大连通子图比例下降缓慢，在大于60%时每种攻击方式的网络中最大连通子图比例均为0。

从图3和图4可以看出随机攻击下的高速公路网络韧性最强。介数在高速公路路网中关键节点识别中权重被低估，综合介数、度值、接近中心性、特征向量中心性、节点流量等五个指标得出的重要度指标若介数中心性对节点重要度影响特别大，将其纳入综合指标后，其作用可能被削弱。此时，按照介数顺序攻击，可能优先攻击到对网络连通性和功能影响更大的节点，从而使网络瘫痪速度更快。

#### 4.3.2. 容量参数的变化对山东高速网路韧性的影响

为观察容量参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 的改变对山东高速网络韧性的影响，本文设置了三组仿真实验，选择重要度攻击方式，先控制 $\alpha$ 的取值，通过改变 $\beta$ 值来确定 $\beta$ 值变化对于网络最大连通子图规模变化情况，再改变 $\alpha$ 的取值，在相同 $\beta$ 值下的变化情况确定 $\alpha$ 值的变化对于网络最大连通子图规模的影响，实验结果如图5、图6、图7所示：

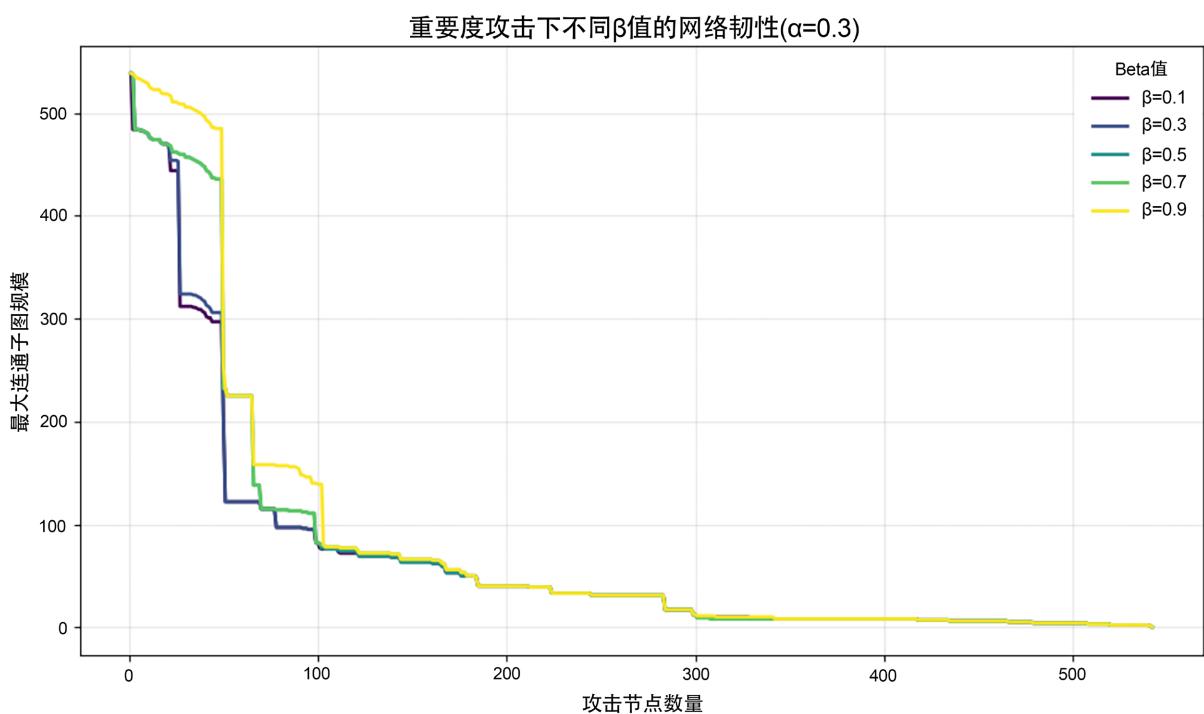
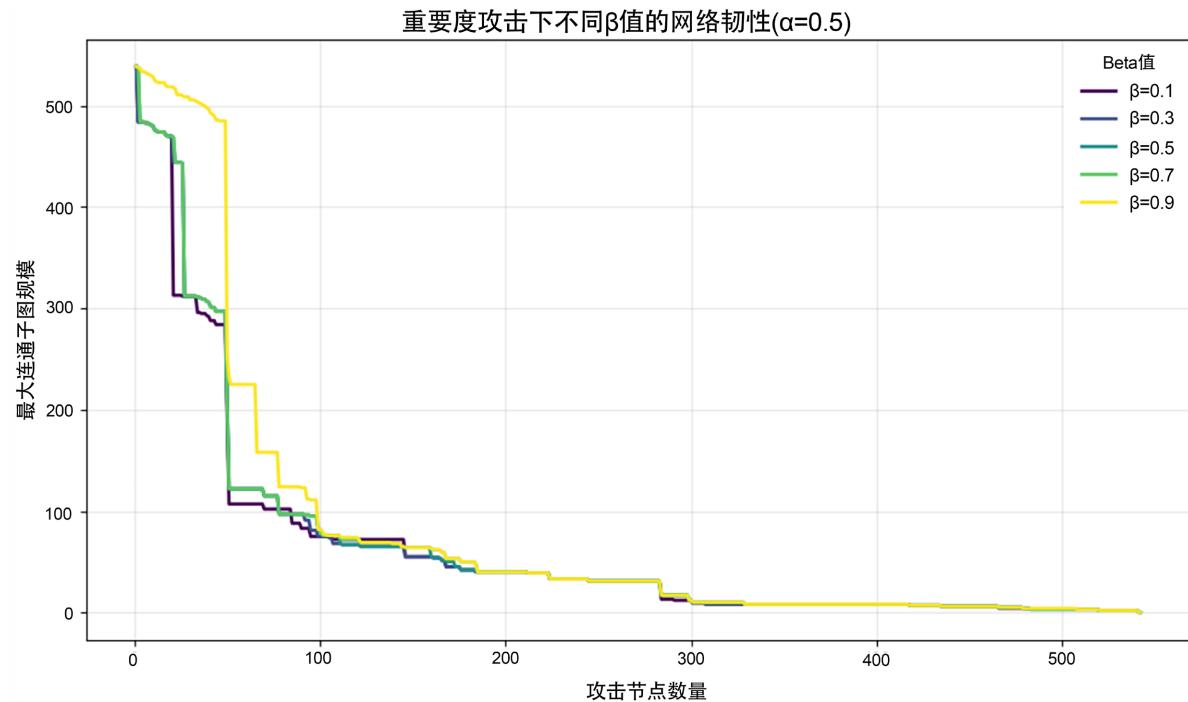


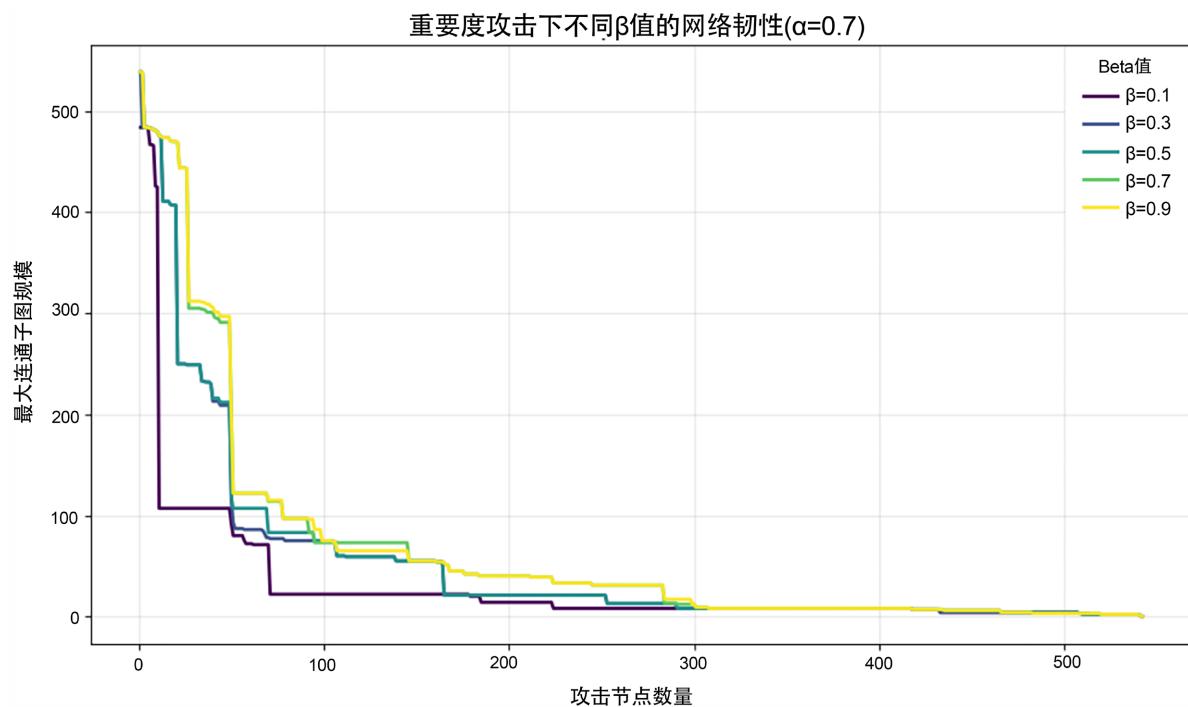
Figure 5. Variation trend of the largest connected component size in the network when  $\alpha = 0.3$   
图5. 当 $\alpha=0.3$ 时网络最大连通子图规模变化趋势

三次实验可以明显看出当 $\alpha$ 的值确定时随着 $\beta$ 值的增大，折线的下降趋势越缓， $\beta=0.9$ 时最大连通子图下降速度最慢，但当 $\alpha=0.3$ 和 $\alpha=0.5$ 时，相同 $\beta$ 的取值对于网络最大连通子图的影响并不显著，当 $\alpha=0.7$ 时相同 $\beta$ 值对比 $\alpha=0.3$ 、 $0.5$ 时区别更为显著，当 $\alpha$ 大于一定值时，对于网络的影响会显著增加，

并且会使网络最大连通子图的下降趋势更加显著, 依据 2.1.1 中的公式 3 可知, 当  $0 < L_i^0 < 1$  时随着指数  $\alpha$  的增大容量  $C_i$  越小, 所以  $\alpha$  越大最大连通子图规模下降越快。



**Figure 6.** Variation trend of the largest connected component size in the network when  $\alpha = 0.5$   
**图 6.** 当  $\alpha = 0.5$  时网络最大连通子图规模变化趋势



**Figure 7.** Variation trend of the largest connected component size in the network when  $\alpha = 0.7$   
**图 7.** 当  $\alpha = 0.7$  时网络最大连通子图规模变化趋势

三次实验中当攻击节点数量小于 100 时最大连通子图规模下降得最为迅速,在攻击节点数量大于 100 时下降速度快速放缓,在攻击数量到达 300 时网络就完全崩溃。

#### 4.3.3. 仿真实验结果分析

实验验证了随机攻击下的网络具有较强的韧性,而对于蓄意攻击下的网络更加敏感,容量参数的变化也会影响网络的韧性,节点容量的变化会影响节点是否会因为被攻击而失效导致最大连通子图规模的变化。

尽管综合了五个参数得出了重要度这一参数来确定网络的关键节点,但实验证明重要度参数的设置并非能完全确认网络中的节点重要性排序,但网络级联失效是一个复杂过程,不同指标从不同角度反映节点特性。研究发现即使综合考虑多个指标,但如果某个因素在特定网络中起主导作用,其重要性可能因其他指标的“稀释”而被低估。如在城市轨道交通网络中,介数中心性高的站点可能是关键换乘点,其失效对网络影响极大,若综合指标中其他因素权重较高,可能降低该站点重要度排名。所以既要避免因只关注单一指标而忽略其他重要因素,也要避免网络中某一因素对于网络影响过大在综合考虑时将其“稀释”。

### 5. 结束语

本研究聚焦山东省高速公路网络韧性,突破传统依赖单一拓扑指标的局限,构建了融合实际交通流量数据的复杂网络模型与非线性级联失效模型,并创新性地提出基于 TOPSIS 多属性决策方法的综合节点重要度评估体系。通过深入模拟分析网络在不同扰动下的级联失效过程,得出以下核心结论与启示:

- 1) 动态失效的破坏性远超预期: 模拟结果明确显示,考虑负载动态重分配过程的动态级联失效对网络的破坏程度远高于静态分析,这极端凸显了在高速公路网络韧性评估中纳入动态过程的重要性。
- 2) 关键节点识别的辩证视角: 虽然构建的综合重要度指标为识别关键节点提供了更全面的视角,但仿真中介数中心性攻击展现的惊人破坏力警示我们: 综合指标可能“稀释”某些单一但至关重要的脆弱性。因此,未来风险评估需结合“综合评估”与“单点预警”策略,既把握全局,也重点监控具有极端拓扑特性的节点。
- 3) 容量冗余是提升韧性的关键: 研究量化证实,提高网络容量参数能显著提升系统抵抗级联失效的能力,是增强韧性的有效途径。

为切实保护山东高速网络关键节点,确保其高效恢复与畅通运行,应强化主动防护机制: 提高节点维护频率以增强抗风险能力,并适度提升关键节点容量,力求实现风险前有效预防,失效后快速恢复。

### 参考文献

- [1] 吴建军. 城市交通网络拓扑结构复杂性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [2] Watts, D.J. and Strogatz, S.H. (1998) Collective Dynamics of ‘Small-World’ Networks. *Nature*, **393**, 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- [3] Barabási, A. and Albert, R. (1999) Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, **286**, 509-512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- [4] 杨琦, 张雅妮, 周雨晴, 等. 复杂网络理论及其在公共交通韧性领域的应用综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 215-229.
- [5] 高自友, 吴建军. 出行者博弈、网络结构与城市交通系统复杂性[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(4): 55-64.
- [6] 高鹏, 胡剑波, 魏高乐. 变权重的城市轨道交通复杂网络鲁棒性分析[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 153-156.
- [7] Zhang, D.M., Du, F., Huang, H., et al. (2018) Resiliency Assessment of Urban Rail Transit Networks: Shanghai Metro as an Example. *Safety Science*, **106**, 230-243. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.023>

- [8] 吴建军, 李树彬. 基于复杂网络的城市交通系统复杂性概述[J]. 山东科学, 2009, 22(4) : 68-73.
- [9] Azolin, G.L., Silva, D.R.N.A. and Pinto, N. (2020) Incorporating Public Transport in a Methodology for Assessing Resilience in Urban Mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **85**, Article 102386. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102386>
- [10] Gonçalves, L. and Ribeiro, P. (2020) Resilience of Urban Transportation Systems. Concept, Characteristics, and Methods. *Journal of Transport Geography*, **85**, Article 102727. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102727>
- [11] Lordan, O., Sallan, J.M., Simo, P. and Gonzalez-Prieto, D. (2014) Robustness of the Air Transport Network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **68**, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.05.011>
- [12] Zhu, W., Liu, K., Wang, M. and Yan, X. (2018) Enhancing Robustness of Metro Networks Using Strategic Defense. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **503**, 1081-1091. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.109>
- [13] Li, T. and Rong, L. (2020) A Comprehensive Method for the Robustness Assessment of High-Speed Rail Network with Operation Data: A Case in China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **132**, 666-681. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.019>
- [14] Dunn, S. and Wilkinson, S.M. (2016) Increasing the Resilience of Air Traffic Networks Using a Network Graph Theory Approach. *Transportation Research Part E*, **90**, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.09.011>
- [15] Motter, A.E. and Lai, Y.C. (2002) Cascade-Based Attacks on Complex Networks. *Physical Review E*, **66**, Article 065102. <https://doi.org/10.1103/physreve.66.065102>
- [16] 张渡清, 吴建军, 杨欣, 等. 复杂网络中的级联失效研究进展[J]. 山东科学, 2024, 37(2): 85-96.
- [17] Vivek, S. and Conner, H. (2022) Urban Road Network Vulnerability and Resilience to Large-Scale Attacks. *Safety Science*, **147**, Article 105575. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105575>
- [18] Aydin, N.Y., Duzgun, H.S., Wenzel, F. and Heinemann, H.R. (2018) Integration of Stress Testing with Graph Theory to Assess the Resilience of Urban Road Networks under Seismic Hazards. *Natural Hazards*, **91**, 37-68. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3112-z>
- [19] 周琴, 徐桂琼. 基于动态级联失效的开发者协作网络鲁棒性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2025, 22(1): 33-42.