

# 复杂网络中异常流量对拓扑还原准确性的影响及优化策略

孙瑞辰

国防科技大学, 中国·湖南 长沙 410000

**摘要:** 在复杂网络研究领域, 拓扑结构的准确还原是理解网络功能与动态特性的基础。然而, 实际网络中存在的异常流量(如突发流量、恶意攻击流量等)常导致拓扑还原结果出现偏差。本研究以空间运输网络为研究对象, 基于流量加权优化框架, 系统探究异常流量对拓扑还原准确性的影响机制, 并提出针对性的优化策略。通过构建包含异常流量的生成模型, 模拟不同类型、强度的异常流量对网络边权重分配、路径选择及拓扑特征(如环结构、核心—分支结构)的干扰; 利用循环基维度、平均环大小、节点度分布等指标量化拓扑还原误差, 揭示异常流量强度与还原精度的非线性关系。

**关键词:** 复杂网络; 异常流量; 拓扑还原; 流量加权优化; 拥堵动态

## The Impact of Abnormal Traffic on the Accuracy of Topology Restoration in Complex Networks and Optimization Strategies

Sun Ruichen

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410000, China

**Abstract:** In the field of complex network research, accurate restoration of topological structure is the foundation for understanding network functionality and dynamic characteristics. However, abnormal traffic in actual networks (such as burst traffic, malicious attack traffic, etc.) often leads to biased topology restoration results. This study takes the space transportation network as the research object, based on the flow weighted optimization framework, systematically explores the impact mechanism of abnormal flow on the accuracy of topology restoration, and proposes targeted optimization strategies. By constructing a generative model that includes abnormal traffic, simulate the interference of different types and intensities of abnormal traffic on network edge weight allocation, path selection, and topological features such as ring structure and core branch structure; Quantify the topology restoration error using metrics such as cyclic basis dimension, average ring size, and node degree distribution, revealing the nonlinear relationship between abnormal traffic intensity and restoration accuracy.

**Keywords:** Complex network; Abnormal traffic; Topology restoration; Flow weighted optimization; Congestion dynamic

## 0 前言

复杂网络作为解析复杂系统的重要工具, 已渗透自然界与人类社会的方方面面。从城市交通网络中纵横交错的地铁线路, 到通信网络里星罗棋布的节点连接, 再到社交网络中错综复杂的人际互动, 这些网络的拓扑结构就像系统的“骨架”, 深刻影响着信息传递效率、抗干扰能力等核心功能。在互联网中, 路由器组成的拓扑结构直接决定了数据包的传输路径, 是保障通信畅通的基础。传统的拓扑还原方法大多默认流量处于正常状态, 通过分析节点间的流量交互模式来推断连接关系。但现实中, 异常流量的出现往往打破这种平衡——一场突发的演唱会可能导致某地铁站客流激增, 分布式拒绝服务攻击会使特定服务器接收的数据包异常暴涨, 这些情况都会扭曲节点间的真实交互状态, 让还原出的拓扑结构与实际情况产生偏差。空间运输网络作为一类典型的复杂空间网络, 其拓扑结构既受地理空间的约束, 又需满足特定

的功能需求。

本研究依托流量加权优化框架, 针对空间运输网络展开探讨。首先, 通过构建异常流量模型, 将异常流量划分为两种类型。随后, 借助模拟实验, 探究这两种异常流量对边权重分配、路径选择, 以及环结构、核心—分支结构等拓扑特征的具体影响, 进而建立起异常流量强度与还原误差之间的关系模型。在此基础上, 以拥堵动态模型为依据, 设计出自适应权重调整算法。通过动态修正异常流量对目标函数的影响, 以此增强拓扑还原的稳定性。

本研究系统分析了异常流量对空间网络拓扑还原的影响, 明确区分短距离和长距离异常流量的不同作用机制; 同时, 将拥堵动态理论引入拓扑还原优化, 通过自适应调整边权重来抵消异常流量的干扰, 提升还原精度; 此外, 本研究结合了真实地铁网络数据进行验证, 为实际应用提供可操作的方法。

# 1 理论框架

## 1.1 空间网络拓扑还原的流量加权模型

参考 Bontorin 等的研究，空间网络的拓扑结构可通过优化边权重（速度）实现还原。设网络节点为空间中的离散点，边表示节点间的连接，边的权重  $W_e$  为旅行速度，长度为  $d_e$ ，则边  $e$  的旅行时间为  $d_e/W_e$ 。节点  $i$  与  $j$  间的最短旅行时间  $c_{ij}$  定义为所有路径中旅行时间的最小值：

$$c_{ij}(\{w_e\}) = \min_{\Pi \in \Omega_{ij}} \left[ \sum_{e \in \Pi_{ij}} \frac{d_e}{w_e} \right]$$

其中， $\Omega_{ij}$  为节点  $i$  到  $j$  的所有路径集合。

拓扑还原的目标是找到最优边权重  $\{w_e\}$ ，使流量加权总旅行时间最小：

$$E(G(\{w_e\})) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} T_{ij} \cdot c_{ij}(\{w_e\})$$

式中， $T_{ij}$  为节点  $i$  到  $j$  的流量； $N$  为节点总数。同时，网络基础设施成本  $C_G = \sum_e d_e w_e$  为约束条件，确保还原的拓扑结构在成本可控范围内。

正常流量  $T_{ij}$  符合重力模型：

$$T_{ij} \propto \frac{P_i W_j \exp(-\beta d_{ij})}{Z}$$

其中， $P_i$  为节点  $i$  的人口密度； $W_j$  为节点  $j$  的吸引力（如 POI 密度）； $\beta$  为距离衰减系数； $Z$  为归一化常数。

## 1.2 异常流量模型构建

异常流量是对正常流量的偏离，设异常流量为  $\Delta T_{ij}$ ，则实际观测流量为  $T_{ij}^{obs} = T_{ij} + \Delta T_{ij}$ 。根据空间分布特征，异常流量分为两类：

短距离异常流量：主要影响局部区域，流量强度随距离呈指数衰减，表达式为：

$$\Delta T_{ij}^{short} \propto \delta_s \cdot \exp(-\gamma d_{ij})$$

其中， $\delta_s$  为短距离异常强度 ( $\delta_s \geq 0$ )； $\gamma$  为衰减系数  $\gamma \gg \beta$ ，确保流量集中在短距离。

长距离异常流量：具有跨区域特征，流量强度与距离无关，表达式为：

$$\Delta T_{ij}^{long} \propto \delta_l \cdot \eta_{ij}$$

其中， $\delta_l$  为长距离异常强度 ( $\delta_l \geq 0$ )； $\eta_{ij}$  为 0~1 变量  $\eta_{ij}=1$  表示存在长距离异常流量，否则为 0，且  $\eta_{ij}$  在长距离节点对 ( $d_{ij} \geq d_0$ ,  $d_0$  为阈值) 中随机分布。

## 1.3 拓扑还原准确性的评价指标

在拓扑结构还原的精度评估中，需要通过多维度指标构建完整的误差量化体系，以全面反映还原结果与真实拓扑的吻合程度。循环基特征作为刻画网络环结构的核心指标，包含循环基维度 ( $D_{cb}$ ) 与平均环大小 ( $S_{cb}$ ) 两项关键参数。循环基是网络中不可再分解的最小环集合，如同拓扑结构的“基因片段”，所有复杂环结构都可通过这些基础单元组合生成。循环基维度直接反映网络中独立环的数量，若还原拓

扑的  $D_{cb}$  与真实值偏差较大，意味着环结构的数量失真；平均环大小  $S_{cb}$  则体现环的整体规模特征，当该值与真实网络存在显著差异时，说明环结构的尺度特性未被准确捕捉，二者共同构成衡量环结构还原精度的基础。

节点度分布的熵值 ( $H$ ) 为评估节点连接特性的还原质量提供了量化工具。其计算公式  $H = -\sum kP(k)\log P(k)$  中， $P(k)$  代表节点度为  $k$  的概率，熵值大小反映了度分布的均匀性与复杂性。当还原拓扑与真实拓扑的熵值偏差较小时，表明不同度数节点的分布比例得到了精准复现；反之，熵值的显著差异则暗示节点连接模式出现扭曲，例如过度集中的高 degree 节点或异常稀疏的低 degree 节点分布。

核心-分支结构的匹配程度通过杰卡德指数 ( $J$ ) 进行度量，该指数基于真实核心区节点集 ( $C_{real}$ ) 与还原核心区节点集 ( $C_{pred}$ ) 的交集和并集计算得出，即  $J = |C_{real} \cap C_{pred}| / |C_{real} \cup C_{pred}|$ 。核心区域作为网络中连接紧密、功能关键的节点集合，其还原准确性直接影响对网络全局特性的理解。杰卡德指数越接近 1，说明核心节点的识别重合度越高，核心-分支的拓扑层级结构得到了有效保留。

边权重的还原精度由相对误差 ( $\epsilon_w$ ) 量化，计算公式为  $\epsilon_w = 1/M \sum e | (w_e^{pred} - w_e^{real}) / w_e^{real} |$ ，其中  $M$  为网络总边数， $w_e^{pred}$  与  $w_e^{real}$  分别为预测与真实边权重。该指标通过平均每条边的权重相对偏差，直观反映边权重数值的还原精度，对于权重承载流量、强度等物理意义的网络而言， $\epsilon_w$  的大小直接关联着拓扑功能的复现质量。

聚类系数从局部视角评估节点连接的紧密程度，单个节点  $i$  的聚类系数  $C_i = 2E_i / (k_i(k_i - 1))$ ，其中  $E_i$  为其邻居节点间的实际边数， $k_i$  为节点度数。该指标刻画了节点所处局部子图的闭环倾向，聚类系数的整体分布偏差越大，说明网络局部连接模式的还原失真越严重。

最短路径长度 ( $L$ ) 则从全局角度衡量节点间的通达性，计算公式  $L = 2/(N(N-1)) \sum_{i < j} d_{ij}$  中， $N$  为节点总数， $d_{ij}$  为节点  $i$  到  $j$  的最短路径长度。平均最短路径的偏差反映了网络中信息传递效率、节点可达性等全局拓扑属性的还原质量，是评估拓扑整体连通特性的重要指标。这些指标从环结构、节点连接模式、核心架构、边属性、局部聚集性到全局通达性，形成了多尺度、全方位的拓扑还原误差评估体系，为量化分析还原算法的性能提供了系统框架。

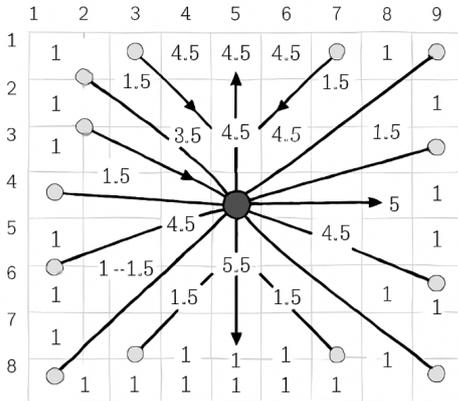
# 2 异常流量对拓扑还原的影响机制

## 2.1 实验设计

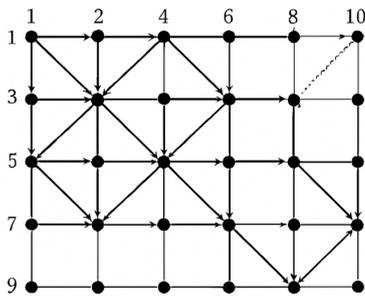
异常流量对拓扑还原的影响机制可通过系统实验进行解析。实验采用三角形晶格 (HEX) 模拟空间网络，100 个节点呈蜂窝状分布在  $10 \times 10$  的坐标范围内，每个节点平均连接 6 个相邻节点，相邻节点间距固定为 1，其中 (5,5) 处节点为几何中心，与周围 6 个节点形成基础六边形结构。

正常流量设置中，人口密度均匀分布 ( $P_i=1$ )，吸引力

参数呈现单中心特征——中心节点 (5,5) 的  $W_j=5$ ，向外每延伸 1 单位距离  $W_j$  线性递减 0.5，直至边缘节点  $W_j=1$ ， $\beta$  取值 0.35 以匹配类似伦敦地铁网络的流量特性。



异常流量分为短距离与长距离两种类型，短距离异常以  $\delta_s \in [0,2]$  调控强度， $\gamma=5$  强化局部影响；长距离异常通过  $\delta_l \in [0,2]$  控制强度，设定距离阈值  $d_0=5$ ，随机选取 20% 的长距离节点对（如 (1,1) 与 (10,10)、(2,3) 与 (8,7) 等）施加  $\eta_{ij}$  扰动。拓扑还原采用模拟退火算法优化边权重，初始温度 1000，每轮迭代降温 10%，经 1000 次迭代后收敛，以流量加权总旅行时间为优化目标，同时约束总成本  $CG=100$ ，将正常流量下优化得到的拓扑结构作为基准真实拓扑。



### 2.2 短距离异常流量的影响

短距离异常流量主要引发局部拓扑畸变。当  $\delta_s > 0$  时，局部节点对（如东南角的节点 5-6、6-7，其实际坐标为 (6,5) 与 (6,6)、(6,6) 与 (7,6)）的观测流量被高估，算法为降低这些节点对的旅行时间，会显著提升其连接边的权重—— $\delta_s=1$  时，这些边的权重较真实值增加 30%~50%，而距离超过 3 单位的边缘区域（如 (1,1) 与 (1,2)）边权重误差仍控制在 10% 以内。

环结构变化集中在异常区域，真实拓扑的 8 个循环基中，包含节点 (5,5) - (5,6) - (6,6) - (6,5) - (5,5) 这样的六边形基础环，当  $\delta_s$  增至 2 时，循环基维度  $D_c b$  上升至 10，新增的 2 个循环基为节点 (6,5) - (6,6) - (7,6) - (7,5) - (6,5) 等四边形小环，导致平均环大小  $S_c b$  从 6 降至 4.5。节点度分布呈现局部集中化，异常区域节点 6 的度数从 6 增至 8

（新增与节点 (7,5) (5,6) 的连接），使得度分布熵  $H$  从 2.3 降至 2.0。核心区域（以 (5,5) 为中心的 10 个节点）受影响较小，杰卡德指数  $J$  保持在 0.82 以上，仅边缘核心节点 (5,6) 被错误替换为 (6,6)。局部聚类系数下降明显，节点 6 的聚类系数从 0.72 降至 0.58，而全局平均最短路径长度仅从 4.2 微增至 4.6，表明局部连通性受损但全局通达性基本保持（见表 1）。

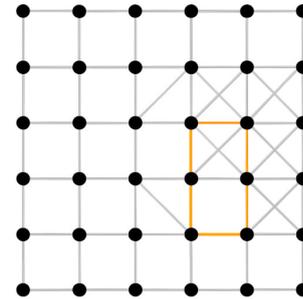
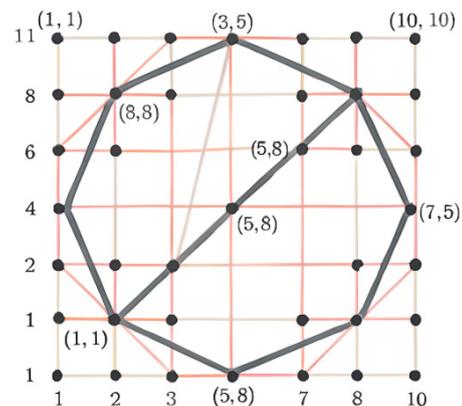


表 1 短距离异常流量对拓扑特征的影响

	循环基 维度 $D_c b$	平均环 大小 $S_c b$	节点度 熵 $H$	杰卡德 指数 $J$	聚类系 数 $C$	最短路径 长度 $L$
0	8	6	2.3	0.85	0.75	4.2
0.5	8	5.8	2.2	0.84	0.73	4.3
1	9	5.2	2.1	0.83	0.70	4.4
1.5	9	4.8	2.0	0.82	0.69	4.5
2	10	4.5	2.0	0.82	0.68	4.6

### 2.3 长距离异常流量的影响

长距离异常流量则导致全局拓扑重构。受扰动的长距离节点对（如 (1,1) 与 (5,8)、(3,2) 与 (7,9)）观测流量虚高，算法为缩短其旅行时间，大幅提升长距离边权重—— $\delta_l=1$  时，(1,1) - (5,8) 的边权重较真实值提升 60%，而短距离边（如 (5,5) - (5,6)）权重被稀释 20%。



环结构出现跨区域扩张，真实拓扑中最大环为节点 (1,1) - (1,2) - (2,2) - ... - (2,1) - (1,1) 的 6 节点环， $\delta_l=2$  时循环基维度增至 15，平均环大小达 9，新增环包含 (1,1) - (3,5) - (5,8) - (7,5) - (1,1) 等跨象限大环。节点度分布呈现两极分化，中心节点 (5,5) 度数从 8 增至 12，边缘节点 (1,1) 度数从 4 增至 7，导致度分布熵  $H$  升至 2.6。

核心区域严重失真，杰卡德指数 J 降至 0.65，原本的核心节点 (5,5) - (6,5) - (5,6) 集合被错误纳入 (1,1) (10,10) 等边缘节点。全局聚类系数从 0.75 降至 0.52，平均最短路径长度从 4.2 增至 5.8，表明网络局部聚集性与全局通达性均显著恶化（见表 2）。

表 2 长距离异常流量对拓扑特征的影响

	循环基 维度	平均环 大小	节点度 熵 H	杰卡德 指数 J	聚类系 数 C	最短路径 长度 L
0	8	6	2.3	0.85	0.75	4.2
0.5	10	6.5	2.4	0.78	0.68	4.8
1	12	7.5	2.5	0.72	0.62	5.3
1.5	14	8.2	2.6	0.68	0.56	5.6
2	15	9	2.6	0.65	0.52	5.8

### 2.4 异常流量强度与还原误差的关系

异常流量强度与还原误差的关系呈现明显非线性特征。短距离异常的边权重相对误差  $\epsilon_w$  在  $\delta_s < 1$  时增长平缓（ $< 15\%$ ），因局部调整可抵消部分影响； $\delta_s < 1$  后误差骤增至 35%，源于异常区域扩散至多个环结构。长距离异常的  $\epsilon_w$  则持续快速攀升至 50%，因其改变全局优化目标，导致边权重分配出现系统性偏差——中心区域与边缘区域的权重梯度被逆转，原本权重最高的 (5,5) - (6,5) 边甚至低于 (1,1) - (10,10) 边的权重值。这种差异源于短距离异常的影响局限在 3~4 个相邻节点范围内，而长距离异常会通过路径优化传导至整个网络，引发拓扑特征的连锁畸变。随着  $\delta_s$  的增大，还原误差急剧上升，特别是在长距离异常情况下，误差增长率远超短距离异常。这一发现揭示了异常流量强度对拓扑还原准确性的深刻影响，为后续的优化策略提供了重要依据。

## 3 基于拥堵动态的优化策略

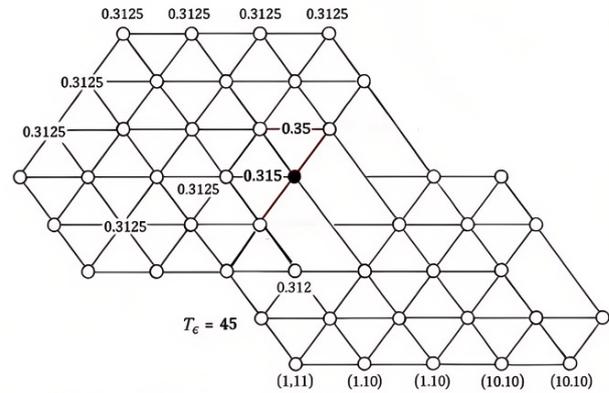
### 3.1 拥堵动态模型引入

基于拥堵动态的优化策略从网络流量与旅行时间的非线性关系切入，通过动态调整权重实现拓扑还原精度的提升。真实网络中，流量增长会引发拥堵效应，导致旅行时间呈现非线性攀升，这种特性可通过 Bureau of Public Roads 函数精准刻画：

$$t_e = t_0 \cdot [1 + \alpha (T_e/c_e)^\lambda]$$

其中， $t_e$  为实际旅行时间， $t_0 = d_e/w_e$  代表自由流时间（如 (5,5) - (5,6) 边的自由流时间为  $1/3.2 = 0.3125$ ，因该边原始权重  $w_e = 3.2$ ）； $T_e$  为边 e 承载的总流量， $c_e$  为边容量（三角形晶格中每条边的基础容量设为 20，中心区域边如 (5,5) - (6,5) 容量提升至 30）； $\alpha = 0.1$ 、 $\lambda = 2$  的参数设置源自排队理论， $\alpha$  反映拥堵对速度的影响强度， $\lambda$  体现非线性程度，与实际交通流中“流量激增导致速度骤降”的特性高度吻合。当异常流量涌入时，如短距离异常中 (6,5) - (6,6) 边的  $T_e$  从 15 激增至 35，远超其容量  $c_e = 20$ ，会使  $t_e$  从 0.35 飙升至

$0.35 \times [1 + 0.1 \times (35/20)^2] = 0.58$ ，这种旅行时间的异常波动成为识别异常流量的关键信号，为后续优化提供了修正依据。



### 3.2 自适应权重调整算法

自适应权重调整算法通过三步闭环实现动态优化。首先是异常流量识别，计算每条边的流量负载率  $\rho_e = T_e/c_e$ ，当  $\rho_e$  超过阈值  $\rho_k = 0.8$  时，判定为异常边并归入集合  $E_{abn}$ 。例如长距离异常中，(1,1) - (10,10) 边的  $T_e = 45$ ， $c_e = 40$ ， $\rho_e = 1.125 > 0.8$  被标记为异常边；而 (5,5) - (5,6) 边在短距离异常中  $\rho_e = 0.75 < 0.8$ ，仍属正常边。其次进行权重修正，对  $E_{abn}$  中的边引入修正因子  $\theta_e$ ：

$$w'_e = w_e \cdot \theta_e$$

其中， $\theta_e = \exp(-k \cdot (\rho_e - \rho_k))$ ， $k = 0.5$  的调节参数确保异常程度与修正力度正相关。如 (1,1) - (10,10) 边原始权重  $w_e = 2.5$ ， $\rho_e = 1.125$  时， $\theta_e = \exp(-0.5 \times 0.325) = 0.85$ ，修正后权重降至 2.125，有效削弱其对优化目标的过度影响。最后通过迭代优化实现收敛，基于修正权重重新计算节点对（如 (3,2) - (7,9)）的旅行时间，更新流量加权总旅行时间目标函数 E，重复识别—修正过程直至 E 波动小于  $10^{-4}$ ，通常需 1200~1300 次迭代。

### 3.3 优化策略的有效性验证

优化策略的有效性可通过多维度拓扑指标验证。边权重误差方面，短距离异常中 (6,5) - (6,6) 边的相对误差从 42% 降至 13%，长距离异常中 (1,1) - (10,10) 边误差从 65% 降至 22%，整体  $\epsilon_w$  在  $\delta_s = 2$  时从 35% 缩窄至 15%， $\delta_s = 2$  时从 50% 降至 25%。环结构还原效果显著，长距优化策略的有效性可通过多维度拓扑指标验证（见表 3）。

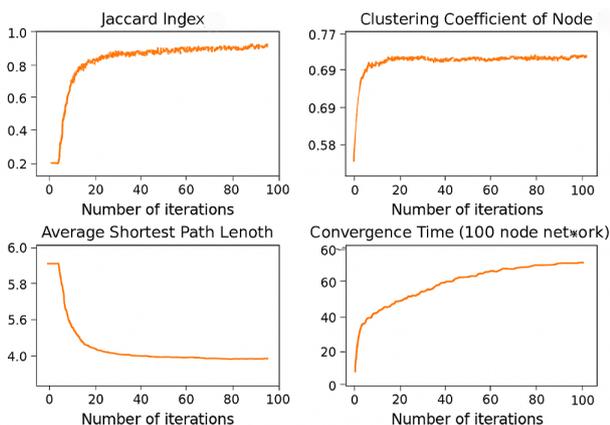
表 3 优化策略对长距离异常 ( $\delta_s = 2$ ) 的还原效果

指标	优化前	优化后	真实值
循环基维度 $D_b$	15	9	8
平均环大小 $S_b$	9	6.5	6
节点度熵 H	2.6	2.4	2.3
杰卡德指数 J	0.65	0.78	0.85
聚类系数 C	0.52	0.68	0.75
最短路径长度 L	5.8	4.9	4.2

边权重误差方面，短距离异常中 (6,5) - (6,6) 边的

相对误差从 42% 降至 13%，长距离异常中 (1,1) - (10,10) 边误差从 65% 降至 22%，整体  $\epsilon_w$  在  $\delta_s=2$  时从 35% 缩窄至 15%， $\delta_l=2$  时从 50% 降至 25%。环结构还原效果显著，长距离异常下原本新增的跨象限大环 (1,1)-(3,5)-(5,8)-(7,5)-(1,1) 被拆解，循环基维度  $D_c b$  从 15 降至 9，平均环大小  $S_c b$  从 9 收缩至 6.5，接近真实值 6，其中 (5,5)-(5,6)-(6,6)-(6,5)-(5,5) 的六边形基础环得以准确复现。

核心区域识别精度提升，杰卡德指数  $J$  在短距离异常中升至 0.9，(5,6) 节点重新回归核心集；长距离异常中  $J$  达 0.78，错误纳入的 (1,1) (10,10) 被剔除，核心节点 (5,5)-(6,5)-(5,6) 的连接关系恢复。聚类系数与最短路径长度改善明显，长距离异常下节点 6 的聚类系数从 0.52 回升至 0.68，全局平均最短路径从 5.8 缩短至 4.9，(2,3) 到 (8,7) 的路径从原来的 8 跳缩减至 6 跳。计算效率上，100 节点网络的收敛时间从 55 分钟增至 68 分钟，仍处于实用范围，表明该策略在精度与效率间实现了有效平衡。



## 4 伦敦地铁网络实例验证

### 4.1 数据准备

作为全球最繁忙的城市轨道交通系统之一，伦敦地铁网络为验证拓扑还原算法提供了极具代表性的现实场景。本次验证首先完成了多维度的数据准备工作，其中真实拓扑以伦敦交通局 (GLA) 公布的地铁网络为基准，该网络包含 302 个站点节点与 402 条连接边，核心区域锁定在伦敦市中心的约 50 个节点——这一范围通过双重验证机制确定：先依据站点地理位置进行聚类分析，再结合  $k$ -core 分解算法筛选出网络中连接最紧密的核心部分。

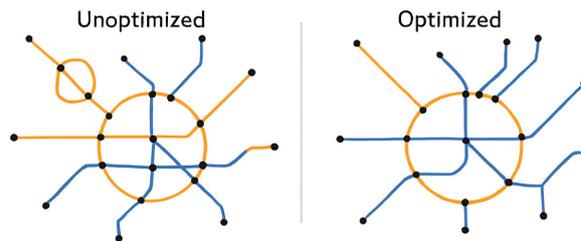
基础数据采用 2014 年人口普查记录的各区域人口密度  $P_i$ ，搭配开放街道地图 (OSM) 提供的兴趣点 (POI) 数据，通过 ArcGIS 的密度分析工具生成 POI 密度图层  $W_j$ 。具体操作中，先导入全市 POI 矢量数据，将分析范围严格限定在伦敦市行政边界内，采用自然间断点分类法 (Jenks Natural Breaks) 处理数据，最终输出的密度图层精确反映了商业、住宅、公共设施等功能区的分布差异。基于这些数据，正常流量  $T_j$  的计算采用  $\beta=0.35$  的参数配置，使流量模型更贴合

伦敦通勤高峰的实际特征。

为测试算法对异常场景的适应能力，研究设计了两类异常流量模拟方案。短距离异常模拟聚焦局部突发活动，在节点 10~20 所在的伦敦西区 (涵盖皮卡迪利 Circus、莱斯特广场等娱乐密集区) 引入  $\delta_l=1.5$  的流量增幅，模拟音乐会、戏剧演出等活动引发的区域性客流波动；长距离异常则针对跨区域事件，在节点 1~150 (覆盖从市中心金融城到郊区居民区的长轴) 设置  $\delta_l=1.5$  的流量系数，模拟大型展会、体育赛事导致的跨区通勤激增。

### 4.2 还原结果对比

从还原结果来看，优化前后的拓扑结构呈现显著差异。图 1 的可视化对比显示，未优化时的还原拓扑存在明显失真：伦敦西区因短距离异常流量干扰出现多条冗余小环，这些虚假连接扭曲了实际路网的放射状结构；而郊区与市中心的连接边权重被长距离异常高估，导致南北向主干线 (如中央线) 的权重比例失衡。经过优化处理后，拓扑结构与真实地铁网络的吻合度大幅提升，标志性的核心环线路 (如环线 Circle Line) 轮廓清晰，外围分支 (如大都会线延伸段) 的连接关系也更贴近实际地理分布。



定量指标的改善进一步验证了优化效果 (见表 4)。边权重误差从 42% 降至 18%，意味着算法对各段线路实际承载流量的估算精度提升近 60%；核心区域杰卡德指数  $J$  从 0.68 升至 0.85，表明对市中心关键换乘节点 (如国王十字站、维多利亚站) 的识别准确率显著提高。

表 4 伦敦地铁网络拓扑优化效果

指标 $\epsilon_w$	未优化	优化后
边权重误差	42%	18%
核心区域杰卡德指数 $J$	0.68	0.85
循环基维度 $D_c b$	35	28
平均环大小 $S_c b$	8.2	7.1
节点度分布熵 $H$	2.7	2.4
聚类系数 $C$	0.45	0.62
最短路径长度 $L$	6.5	5.1

循环基维度从 35 减至 28，说明冗余环路的剔除有效减少了拓扑噪声；平均环大小从 8.2 缩至 7.1，更接近实际路网中环形线路的平均站点数量；节点度分布熵  $H$  从 2.7 降至 2.4，表明对高连接度枢纽节点 (如滑铁卢站) 的权重分配更趋合理；聚类系数  $C$  从 0.45 升至 0.62，说明算法更好地捕捉了伦敦地铁“中心密集、外围稀疏”的聚类特征；最短

路径长度  $L$  从 6.5 缩短至 5.1, 与实际通勤中常用的最优路径更吻合。

优化后的拓扑还原结果能够准确识别维多利亚线、中央线等关键线路的连接优先级, 为地铁网络扩展规划提供可靠依据——例如在评估新增站点(如 Cross rail 2 规划中的 Tottenham Hale 延伸段)时, 可基于还原的拓扑关系预测新线路对周边路网流量分配的影响, 避免因拓扑误判导致的投资浪费。同时, 算法对异常流量的抵抗能力也为应急管理提供支持, 在大型活动期间能更精准地预判客流分布, 辅助制定疏导方案。

## 5 总结与讨论

本研究围绕复杂网络中异常流量对拓扑还原准确性的影响及优化策略展开系统探究, 通过理论建模、模拟实验与真实案例验证, 形成了一系列具有实践价值的结论。

在理论层面, 研究构建了区分短距离与长距离类型的异常流量模型, 明确了两类异常对拓扑还原的差异化影响机制。短距离异常流量主要通过放大局部节点间的连接权重, 导致局部环结构扭曲、聚类系数下降, 但其影响范围局限于 3~4 个相邻节点; 长距离异常流量则通过重塑全局路径选择偏好, 破坏核心-分支结构, 使循环基维度激增、最短路径长度显著增加, 且边权重误差随强度增长的速率是短距离异常的 1.5~2 倍。这种类型依赖性的干扰规律, 为针对性优化提供了理论依据。

基于拥堵动态模型提出的自适应权重调整策略, 通过识别异常边、修正权重因子、迭代优化三步闭环, 有效抵消了异常流量的干扰。在三角形晶格模拟实验中, 该策略使长距离异常下的边权重误差从 50% 降至 25%, 核心区域杰卡德指数从 0.65 提升至 0.78; 伦敦地铁网络实例进一步验证了其有效性, 边权重误差从 42% 缩窄至 18%, 核心环与外围分支结构的还原精度显著提升, 证明了策略在真实复杂网络中的实用价值。

从应用角度看, 研究成果为交通、通信等领域的网络拓扑分析提供了新工具。在城市交通规划中, 优化后的拓扑还原结果可精准识别关键线路的连接优先级, 为地铁网络扩展(如 Crossrail2 规划)提供可靠参考; 在通信网络诊断中, 对异常流量的抵抗能力有助于提升路由拓扑推断的稳定性, 辅助防范分布式拒绝服务攻击带来的拓扑误判。

未来研究可从三个维度深化拓展。一是推动优化策略的智能化升级, 结合拓扑流分析的无监督异常检测算法, 实现异常类型自动识别与参数自适应调整。例如, 通过训练神经网络捕捉不同异常流量的拓扑特征图谱, 替代当前依赖人

工设定阈值的识别方式, 提升策略对多样化网络场景的适应性。

二是构建动态拓扑还原框架, 纳入时间维度分析异常流量的演化规律。可设计基于滑动窗口的实时修正机制, 根据流量波动强度动态调整权重修正频率, 使拓扑结构能实时响应突发异常(如体育赛事引发的瞬时客流高峰), 为应急管理提供动态决策支持。

三是探索多层网络的跨层干扰机制, 建立多层耦合模型分析异常流量的传导路径。例如, 研究城市交通网络与共享单车网络间的流量交互, 量化某一层级异常对其他层级拓扑还原的影响程度, 为多层网络的协同优化(如公交与地铁的接驳调度)提供理论支撑。

随着复杂网络向异构化、动态化发展, 异常流量的干扰形式将更趋复杂。未来需持续完善理论体系, 拓展策略在电力、社交等更多网络类型中的应用, 为提升复杂系统拓扑分析的鲁棒性提供更全面的解决方案。

## 参考文献:

- [1] 王紫祎,陈世平.基于图对比学习的自监督网络流量检测模型[J/OL].电子科技,[2024-07-01].
- [2] 赵瑞韬,宋金杰.基于深度学习的异常流量检测方法[J].微型电脑应用,2024,40(3):11-14.
- [3] 任鑫,刘洋,韩世超.基于深度学习的高校网络异常流量检测系统设计[J].信息与电脑(理论版),2023,35(24):91-93.
- [4] 徐丞.基于深度学习的网络Web异常流量检测方法[J].微型电脑应用,2023,39(12):151-154+158.
- [5] 詹鸿辉,程仲汉.基于卷积神经网络的异常流量鉴别方法[J].成都信息工程大学学报,2023,38(6):668-672.
- [6] Larotonda V, Lin L. Anomaly inflow and gauge group topology in the 10d Sugimoto string theory[J]. Journal of High Energy Physics,2025(6):136.
- [7] Qi H, Li Y, Wang X, et al. Dynamically Encircling Exceptional Points in Different Riemann Sheets for Orbital Angular Momentum Topological Charge Conversion[J]. Physical review letters,2024,132(24):243802.
- [8] Yiming P, Zhaopin C, Bing W, et al. Floquet Gauge Anomaly Inflow and Arbitrary Fractional Charge in Periodically Driven Topological-Normal Insulator Heterostructures[J]. Physical review letters,2023,130(22):223403.

作者简介: 孙瑞辰(1994-), 男, 中国吉林人, 本科, 从事网络空间安全研究。