DOI:10.11918/202301024

一种基于改进 ELECTRE 算法的 Tor 网络节点重要度评估方法

季伟杰,翟江涛,刘光杰

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京 210044)

摘 要:为解决当前 Tor 网络拓扑研究中存在的难以快速分析其网络重要节点,进而难以发现薄弱环节和隐藏服务的问题,提出一种基于改进 ELECTRE(elimination and choice translating reality)算法的 Tor 网络节点重要度评估方法。该方法将熵权法(the entropy weight method,EWM)与 ELECTRE 算法相结合,将节点参数矩阵规范化后加权,确定一致性矩阵和不一致性矩阵,得出聚合优势矩阵,对各个节点的重要度进行排序。采用全局网络效率、自然连通度和最大连通子图对 Tor 网络的抗毁性进行量化,通过删除节点后抗毁性的变化对节点重要度评估方法进行比较。实验结果表明:在删除 15 个节点后,基于本文方法的网络抗毁性下降了 79.25%;与 5 种对比方法相比,网络抗毁性的下降比例分别高出 0.31%、0.60%、0.68%、3.68% 和 0.98%,说明本文方法节点重要度评估准确度更高,并且简化了计算过程,避免了人为因素带来的评估偏差,提高了计算效率。所提方法能够准确定位 Tor 网络中的重要节点,反映节点在维持网络结构稳定性中的关键作用,有助于对目标节点进行追踪,发现潜在威胁,为 Tor 网络安全防护与脆弱性分析提供了有力支持。

关键词:Tor 网络;节点重要度;熵权法;ELECTRE 算法;网络抗毁性

中图分类号:TP301 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)09-0209-08

Evaluation method for node importance of Tor network based on improved ELECTRE algorithm

Ji Weijie, Zhai Jiangtao, Liu Guangjie

(School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To address the challenge in current Tor network topology research of rapidly identifying critical nodes for detecting weak links and hidden services, this paper proposes a node importance evaluation method for the Tor network based on an improved ELECTRE (elimination and choice translating reality) algorithm. The proposed method integrates the entropy weight method (EWM) with the ELECTRE algorithm. After normalizing the node parameter matrix and applying entropy-based weights, the method constructs the concordance and discordance matrices, derives the aggregated dominance matrix, and ranks the nodes according to their importance. The global network efficiency, natural connectivity, and largest connected subgraph size are employed to quantify the network's invulnerability. Changes in these metrics after node removal are used to compare different node importance evaluation methods. Experimental results show that after removing 15 nodes, the network resilience of our method decreased by 79.25%; compared with the five comparison methods, the decrease in network resilience is 0.31%, 0.60%, 0.68%, 3.68%, and 0.98% higher, indicating that the method proposed in this paper has higher accuracy in node importance evaluation. Moreover, it simplifies the calculation process, avoids evaluation bias caused by human factors, and improves computational efficiency. Overall, the proposed method effectively identifies critical nodes in the Tor network, highlights their role in maintaining network structural stability, and provides strong support for threat detection, target node tracking, and vulnerability analysis in Tor network security.

Keywords: Tor network; node importance; the entropy weight method; elimination and choice translating reality algorithm; the invulnerability of network

收稿日期:2023-01-09;**录用日期**:2023-02-24;**网络首发日期**:2024-06-24
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240622.1047.014
基金项目:国家自然科学基金(61931004,62072250);国家重点研发计划(2021QY0700)
作者简介:季伟杰(1999—),男,硕士研究生;刘光杰(1980—),男,教授,博士生导师
通信作者:翟江涛,jiangtaozhai@nuist.edu.cn

Tor作为一种当前使用最为广泛的匿名网络,利用洋葱路由协议实现匿名通信[1],通过一组中继设备重定向流量,其中每个中继设备均会为转发的数据添加一层加密内容,进而实现身份匿名,规避网络监管,有效保护用户隐私。Tor还可以为功能不同的服务器提供匿名服务,避免其泄露任何位置信息。这些服务通过洋葱统一资源定位系统(onion uniform resource locator, Onion Url)标识,不与任何IP地址关联,只通过支持Tor的浏览器访问,实现双向匿名。

作为一种比较成熟的匿名网络,Tor网络实现了高度的匿名性。同时,许多不法分子借Tor网络躲避网络监管,从事非法活动[2],给网络的可管可控带来了极大威胁。为此,研究人员尝试在流量侧分析其通信行为和结构以洞察Tor网络上的承载行为。目前关于Tor网络的研究大体分为4类:1)评估其实际匿名水平,寻找Tor的漏洞和弱点,设计有效攻击,并提出可能的应对措施[3-5]。2)分析Tor隐藏服务的主题及其内容与受欢迎程度的关系,以了解Tor与非法活动的关联程度[6-7]。3)分析通信拓扑,从图论的角度展开研究,尝试总结Tor网络的结构性质特征[8-11],如网络的度分布、社团结构以及承载内容相关的分布与指标。4)根据Tor网络流量的各种特征,对其进行分类识别,从而找出隐藏的恶意代码和恶意流量,提升网络监管水平[12-14]。上述研究工作大多数集中在Tor网络的承载业务识别和匿名性能分析上,对其拓扑结构和各个节点重要性的研究十分有限,这将影响对Tor网络匿名性、隐藏服务等方面的深入研究。

鉴于此,本文提出一种基于改进ELECTRE算法[15]的Tor网络节点重要度评估方法,根据熵权法分配各属性权重,利用改进的ELECTRE算法筛选出重要度较高的节点,旨在弥补节点重要性方面工作的不足,方便科研人员更好地了解Tor网络的拓扑结构,辅助识别关键节点。

1 Tor网络拓扑研究现状

截至目前,针对Tor网络拓扑结构的研究已经取得许多成果。Zabihimayvan等[16]收集了1 766个不同洋葱域的7 782个页面数据,分析了页面的主题与网络,借此评估了英文Tor网页的内容。根据托管的信息和服务将域分为9类,发现其中某些域会有意将自身与Tor的其余部分分隔。与之类似,Takaaki等[17]通过ichidan搜索引擎和fresh onions网站收集了大量的洋葱域,将其分为6类,创建了有向图以研究每个实例的特征及其之间的关系。Ghosh等[18]利用另一种自动化工具探索Tor网络并分析其网站的内容,在此基础上,通过聚类Tor服务将内容进行分类。这些工作往往只是利用拓扑图辅助研究网页的内容和语义,没有分析Tor网络节点和拓扑结构。

De Domenico等[8]提取出了部分暗网拓扑的特征,并提出了一个Tor网络的生成模型以研究其弹性,但该模型是在自治系统(autonomous system)级别上考虑整个网络拓扑的。2017年,Bernaschi等[9]利用BUbiNG爬虫收集数据,并从页面级(page graph)、主机级(host graph)和服务级(service graph)3个层次对Tor的网络拓扑图进行了分析。研究中同时考虑了有向图与无向图,并结合语义分析方法探讨了其与网络拓扑特征之间的关系。然而,该研究主要聚焦于拓扑图自身的基本指标分析,如度分布、中心性以及连通分量等,尚未深入探讨其结构性质在网络安全或匿名性方面的具体影响。Alharbi等[10]对一个包含48 174个节点和103 526条边的Tor网络拓扑图进行了实证研究。结果表明,节点的入度服从幂律分布,并与网页排名及特征向量中心性高度相关,而出度则不符合幂律分布。此外,类似于传统互联网的拓扑结构,Tor网络同样表现出小世界性和无标度性特征。Bernaschi等[11]进一步研究了Tor网络在动态波动环境下的拓扑结构演化,推测了网络中用户之间可能存在的交互模式。研究指出,Tor网络拓扑结构中包含一个规模较小的强连接子图,其在整体网络连通性中起核心作用。从该子图出发,仅需少数跳数即可抵达网络的其他区域,因此外围节点的波动对整体拓扑结构的影响较小。

在网络节点重要度研究方面,Lalou等[19]分类讨论了关键节点检测问题(critical node detection problem, CNDP),并对其若干变体的最新研究进展进行了分类综述,涵盖了理论复杂性分析、精确求解算法、近似方法及启发式策略等方面。该研究指出,CNDP可广泛应用于网络风险管理、脆弱性评估、社会网络分析及通信网络优化等多个领域。针对鲁棒性研究,很少考虑攻击代价和传统的度指标不能完全反映节点重要性的问题,Wang等[20]在综合航空货运网络的拓扑结构、行业特性与网络方向性的基础上,提出了一种基于topsis方法的节点重要性评估框架,用以更有效地衡量节点在面临攻击时的关键程度。此外,研究还构建了一个考虑攻击代价约束的最优攻击策略模型,该模型能够根据攻击预算以及防御方对关键节点关注程度的不同灵活调整攻击路径,从而提升攻击效率。Ruan等[21]提出了一种基于局部结构特征的关键节点识别方法,目的是

识别在维持网络连通性方面具有关键作用的节点。该方法不仅考虑了节点本身的连接情况，还引入了其邻域结构的连通性特征。通过在多个真实网络上的仿真实验表明，该方法在识别关键节点方面优于若干传统启发式算法。上述研究主要集中在一般的复杂网络和现实世界的交通网络上，没有针对 Tor 网络研究其节点重要度。

综上所述，在关于 Tor 网络的研究中，目前主要的方向还是分析网络中的内容，针对拓扑图结构的研究仍不充分，且只是通过一些指标将其简单陈述，并没有深入探讨某个关键节点对网络的影响以及整个网络的抗毁性[22]。因此，本文将研究如何判断 Tor 网络拓扑中节点重要度、整个网络的抗毁性以及两者之间的关联。

2　本文方法

基于改进 ELECTRE 算法[15]的 Tor 网络节点重要度评估方法是将节点参数矩阵规范化后加权，根据加权规范化决策矩阵确定一致性矩阵和不一致性矩阵，再得出聚合优势矩阵，对各个节点的重要度进行排序。其节点重要度计算流程如图 1 所示。

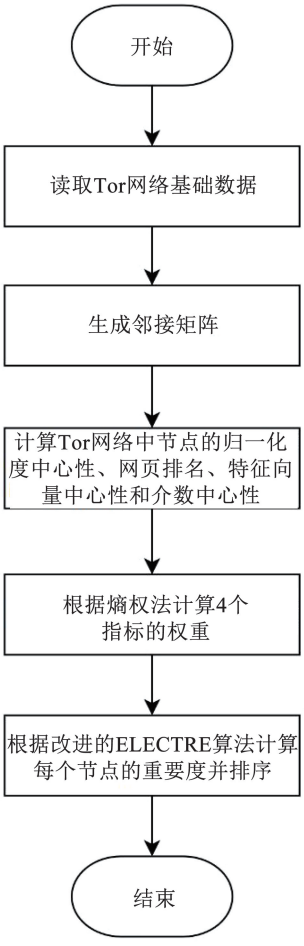


图 1　节点重要度计算流程

Fig. 1　Process of node importance evaluation

2.1　节点重要度指标

节点重要度的计算大都利用几种经典识别算法或对算法加以改进得出，因此，从节点本身的重要性、相邻节点的重要性等维度综合考量，选取归一化度中心性[23]、网页排名[24]、特征向量中心性[25]和介数中心性[26]作为本文方法的 4 个指标，保证排序精度。

2.1.1　归一化度中心性

在无向图中，节点 v 的度中心性被定义为直接与该节点关联的边的条数，度中心性越大，该节点在网络中越重要，其计算式为

$$C_{\mathrm{d}}(v_i) = \sum_{j=1}^{N} a_{ij} \tag{1}$$

式中：$C_{\mathrm{d}}(v_i)$为节点v_i的度中心性；N 为所有节点的数量；a_{ij}反应了节点间的连接情况，若顶点v_i和v_j之间有边，则$a_{ij}=1$，反之则为 0。

考虑到大规模网络度中心性差距较大的情况，需要对其进行归一化，计算式为

$$C_{\mathrm{nd}}(v_i) = \frac{C_{\mathrm{d}}(v_i)}{N-1} \tag{2}$$

式中$C_{\mathrm{nd}}(v_i)$为节点v_i的归一化度中心性。

2.1.2　网页排名

网页排名的工作原理是计算页面链接的数量与质量，以确定网站的重要性，计算式为

$$R_{\mathrm{p}}(p_i) = \frac{1-d}{N} + d\sum_{p_j \in M(p_i)} \frac{R_{\mathrm{p}}(p_j)}{L(p_j)} \tag{3}$$

式中：$R_{\mathrm{p}}(p_i)$、$R_{\mathrm{p}}(p_j)$分别为页面p_i、p_j的网页排名；d 为阻尼系数，取 0.85；$M(p_i)$为链入p_i页面的集合；$L(p_j)$为链出p_j页面的数量。

由于网页排名的计算是通用的，适用于任何领域的图形或网络，所以将其作为计算节点重要度的一个指标。无向图中节点v_i的网页排名为

$$R_{\mathrm{p}}(p_i) = \frac{1-d}{N} + d\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\frac{R_{\mathrm{p}}(p_j)}{C_{\mathrm{d}}(v_i)} \tag{4}$$

2.1.3　特征向量中心性

特征向量中心性综合了节点自身的度以及其邻居节点的重要性，特征向量中心性高意味着该节点与许多本身特征向量中心性高的节点相连，具体计算式为

$$C_{\mathrm{e}}(v_i) = \lambda^{-1}\sum_{j=1}^{N} a_{ij}\boldsymbol{f}_{ij} \tag{5}$$

式中：$C_{\mathrm{e}}(v_i)$为节点v_i的特征向量中心性，λ 为邻接矩阵的最大特征值，$\boldsymbol{f}_{ij}$为最大特征值 λ 对应的特征向量。

2.1.4　介数中心性

介数中心性是基于最短路径的中心性度量，每

个节点的介数中心性即为这些最短路径穿过该节点的次数。介数中心性代表了节点彼此之间互动的程度,其越高意味着节点的控制能力越强,因为会有更多的信息流经该节点。介数中心性表达式为

$$C_{\mathrm{b}}(v_i) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v_i)}{\sigma_{st}} \tag{6}$$

式中:$C_{\mathrm{b}}(v_i)$为节点v_i的介数中心性;σ_{st}为从节点 s 到节点 t 的所有最短路径的条数;$\sigma_{st}(v_i)$为节点 s 到节点 t 的所有最短路径中,经过节点v_i的路径条数。

2.2 改进的 ELECTRE 算法及其效率分析

改进的 ELECTRE 算法结合熵权法[27]计算每个节点的重要度,传统算法在得出一致性矩阵和不一致性矩阵后分别计算出阈值,将原矩阵的元素逐一与阈值比较后得出一致性、不一致性优势矩阵,在此基础上得出的聚合优势矩阵只包含 0 和 1 两个元素,随着节点的增多,精度会大幅下降。

传统 ELECTRE 算法和改进的 ELECTRE 算法区别如图 2 所示。改进的 ELECTRE 算法省略了计算阈值和生成一致性、不一致性优势矩阵两步,直接根据一致性矩阵和修正型不一致性矩阵计算聚合优势矩阵,提高精度的同时简化了计算。

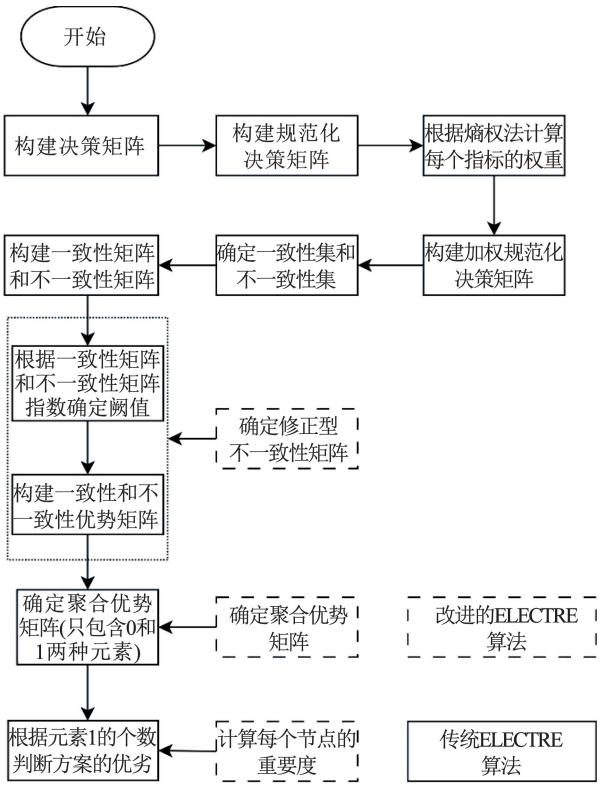


图 2 改进的 ELECTRE 算法

Fig. 2 Improved ELECTRE algorithm

改进的 ELECTRE 算法步骤如下:

1)构建决策矩阵。通过可用信息构造 m 个节点和 n 项指标的决策矩阵 $\boldsymbol{A}$。

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \tag{7}$$

式中x_{mn}为第 m 个节点在第 n 项指标下的度量。

2)构建规范化决策矩阵。将决策矩阵的条目转换为无量纲的可比较条目。规范化决策矩阵 $\boldsymbol{R}$ 及其第 i 行第 j 列元素r_{ij}的计算式分别为:

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \cdots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \tag{8}$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m} x_{kj}^2}} \tag{9}$$

式中x_{ij}、x_{kj}分别为第 i、k 个节点在第 j 项指标下的度量。

3)根据熵权法计算每个指标的权重。首先,将决策矩阵 $\boldsymbol{A}$ 归一化后计算第 j 项指标下第 i 个节点占该指标的比重ρ_{ij}。

$$\rho_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}} \tag{10}$$

其次,求第 j 项指标的熵值s_j。

$$s_j = -u \sum_{i=1}^{n} \rho_{ij} \ln \rho_{ij} \tag{11}$$

式中 u 为常数,通常为指标总数取对数后的倒数。

然后,计算第 j 项指标的差异系数d_j。

$$d_j = 1 - s_j \tag{12}$$

最后,得到第 j 项指标的权重ω_j。

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m} d_j} \tag{13}$$

4)构建加权规范化决策矩阵。将规范化决策矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的每一列乘以对应指标的权重,得到加权规范化决策矩阵 $\boldsymbol{V}$。

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{R}\boldsymbol{W} \tag{14}$$

其中

$$\boldsymbol{W} = \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \omega_n \end{pmatrix} \tag{15}$$

式中 $\boldsymbol{W}$ 为权重矩阵。

由于 $\sum \omega_n = 1$，则 $\boldsymbol{V}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{V} = \begin{pmatrix} \omega_1 r_{11} & \omega_2 r_{12} & \omega_3 r_{13} & \cdots & \omega_n r_{1n} \\ \omega_1 r_{21} & \omega_2 r_{22} & \omega_3 r_{23} & \cdots & \omega_n r_{2n} \\ \omega_1 r_{31} & \omega_2 r_{32} & \omega_3 r_{33} & \cdots & \omega_n r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_1 r_{m1} & \omega_2 r_{m2} & \omega_3 r_{m3} & \cdots & \omega_n r_{mn} \end{pmatrix} \tag{16}$$

5）确定一致性集和不一致性集。两个不同节点 A_k 和 A_l（$m \geqslant k, l \geqslant 1$）的一致性集 C_{kl} 定义为 A_k 不劣于 A_l 的所有元素的集合，即

$$C_{kl} = \{j, v_{kj} \geqslant v_{lj}\} \tag{17}$$

式中：$j = 1,2,3,\cdots,n$；v_{kj}、v_{lj} 分别为 A_k、A_l 的第 j 个元素。

C_{kl} 的补集 D_{kl} 为不一致性集，即 A_k 劣于 A_l 的所有元素的集合。

$$D_{kl} = \{j, v_{kj} < v_{lj}\} \tag{18}$$

6）构建一致性矩阵和不一致性矩阵。一致性矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中元素的相对值通过一致性指数估计。一致性指数 c_{kl} 是与一致性集中包含的指标相关联的权重之和，即

$$c_{kl} = \sum_{j \in C_{kl}} \omega_j \tag{19}$$

一致性矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的表达式为

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} - & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & - & c_{23} & \cdots & c_{2m} \\ c_{31} & c_{32} & - & \cdots & c_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \cdots & - \end{pmatrix} \tag{20}$$

式中“-”表示矩阵中元素值缺失。

不一致性矩阵 $\boldsymbol{D}$ 表示节点 A_k 弱于节点 A_l 的程度。$\boldsymbol{D}$ 及其元素 d_{kl} 的表达式分别为：

$$\boldsymbol{D} = \begin{pmatrix} - & d_{12} & d_{13} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & - & d_{23} & \cdots & d_{2m} \\ d_{31} & d_{32} & - & \cdots & d_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & d_{m3} & \cdots & - \end{pmatrix} \tag{21}$$

$$d_{kl} = \frac{\max\limits_{j \in D_{kl}} |v_{kj} - v_{lj}|}{\max\limits_{j} |v_{kj} - v_{lj}|} \tag{22}$$

7）确定修正型不一致性矩阵。修正型不一致性矩阵 $\boldsymbol{D}'$ 中的元素与一致性矩阵中的元素相同，其值越小代表节点越重要，表达式为

$$\boldsymbol{D}' = \begin{pmatrix} - & d'_{12} & d'_{13} & \cdots & d'_{1m} \\ d'_{21} & - & d'_{23} & \cdots & d'_{2m} \\ d'_{31} & d'_{32} & - & \cdots & d'_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d'_{m1} & d'_{m2} & d'_{m3} & \cdots & - \end{pmatrix} \tag{23}$$

式中 $d'_{m3} = 1 - d_{m3}$。

8）确定聚合优势矩阵。聚合优势矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 中的元素由一致性矩阵和修正型不一致性矩阵对应位置的元素相乘得到，即

$$\boldsymbol{Q} = \begin{pmatrix} - & q_{12} & q_{13} & \cdots & q_{1m} \\ q_{21} & - & q_{23} & \cdots & q_{2m} \\ q_{31} & q_{32} & - & \cdots & q_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & q_{m3} & \cdots & - \end{pmatrix} \tag{24}$$

式中 $q_{m3} = c_{m3} d'_{m3}$。

9）计算每个节点的重要度。节点重要度即为聚合优势矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 对应列所有元素之和。节点 v_i 的重要度为

$$I_{\text{no}}(v_i) = \sum_{j=1}^{m} q_{ij} \tag{25}$$

式中：$I_{\text{no}}(v_i)$ 为节点 v_i 的重要度，q_{ij} 为聚合优势矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 第 i 行第 j 列的元素。

对所有节点的重要度进行排序，其值越小代表节点越重要。

改进后的 ELECTRE 算法与传统 ELECTRE 算法虽然整体的时间复杂度均为 $O(m^2)$，但传统算法确定阈值和构建一致性、不一致性优势矩阵时需要进行 5 次时间复杂度为 $O(m^2)$ 的计算，改进后的算法则只需进行 1 次时间复杂度为 $O(m^2)$ 的计算即可确定修正型不一致性矩阵，因此，改进后的算法在实际运算中效率更高。

3　实验与分析

3.1　实验环境与数据集

实验主机配置：操作系统为 64 位 Windows 10，CPU 为 Intel Core i7-9700H @ 3.00 GHz，32 G 内存，所有实验均在 MATLABR2021B 上完成。

采用数据集“22Feb2017. services. edges”验证所提节点重要度评估方法的有效性。该数据集使用一个带有种子列表的定制爬虫，通过从标准的 Tor 专属搜索引擎获得的 Onion Url 或者合并 Tor wiki 和链接目录上发布的 Onion Url 组合而成，从 2017 年 1 月1 日至 2017 年 2 月 22 日运行 53 d，得到一个共计 12 832 个节点和 72 556 条边的 Tor 网络拓扑。

3.2　评价指标与算法

采用网络抗毁性评价节点重要度算法的准确性。网络抗毁性即网络在面对各种不利因素或者攻击时，仍然能保持其功能性、稳定性和连通性的能力。本文采用网络效率[28]、自然连通度[29]和极大连通子图[30]的相对大小进行简化表征。节点的重要度越高，其对网络抗毁性的影响越显著；当该节点

被移除时,网络抗毁性下降更为明显。

网络效率是衡量网络交换信息效率的指标。在全局范围内,其量化了整个网络的信息交换能力,局部效率则在小范围内量化了网络的抗故障能力。如果一个网络具有较高的局部效率,那么即使网络中的某个节点受到损坏或移除,其邻居节点之间依然可以快速、有效地传递信息。相较于局部效率,全局效率考虑了网络中所有节点对之间信息传递路径的效率,能够综合评估网络中信息传递的速率,从而很好地反映网络的整体连通性,更适合分析整个网络的性能和结构,因此,本文所述网络效率为全局效率。Tor 网络的全局效率E_G的表达式为

$$E_G = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in H} \frac{1}{d_{ij}} \tag{26}$$

式中:d_{ij}为节点间最短路径的长度,H 为网络中所有节点的集合。

自然连通度是一种基于图谱的复杂网络的鲁棒性度量,网络鲁棒性可以由顶点间路线的冗余来表示,存在的替代路线越多,顶点间的连通性越强。自然连通度反映网络中节点之间冗余路径的丰富程度,公式为

$$\bar{\lambda} = \ln\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} e^{\lambda_i}\right) \tag{27}$$

式中λ_i为邻接矩阵的第 i 个特征值。

极大连通子图在无向图中又称连通分量,是指网络图中节点数尽量最多、范围最大的一个子图,其值越大,网络的抗毁性越强。为了避免网络规模过大导致连通分量过大的问题,采用相对极大连通子图进行计算,其公式为

$$C_{rc} = \frac{\text{极大连通子图包含节点数}}{\text{网络总节点数}} \tag{28}$$

式中C_{rc}为网络图的相对极大联通子图。

网络抗毁性 I 可以表示为

$$I = E_G \times \bar{\lambda} \times C_{rc} \tag{29}$$

网络抗毁性计算算法的流程如图 3 所示。按照节点重要度由高至低的顺序依次删除节点及其相应的连接边,每删除一个节点,Tor 网络的拓扑结构将发生变化,网络抗毁性也随之下降;计算每一次删除节点后的网络抗毁性,共计删除 15 个节点,实现对节点重要度算法的评价。

3.3 实验结果

为验证本文节点重要度评估方法的有效性,将其与 EW-VIKOR[31]、C_{nd}[23]、R_p[24]、C_e[25] 和 C_b[26] 5 种方法在数据集“22Feb2017. services. edges”上分别进行 15 次实验,得出每种方法排名重要度前 15 的节点,其节点序号见表 1。

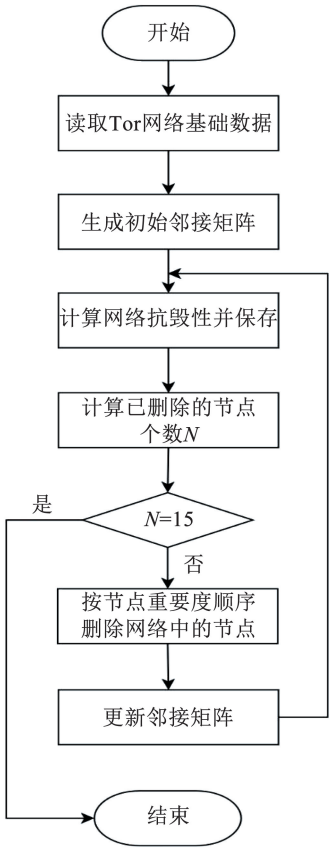


图 3 网络抗毁性计算算法流程

Fig. 3 Process of network invulnerability evaluation algorithm

表 1 节点重要度排序

Tab. 1 Ranking of node importance

本文方法	EW-VIKOR	C_{nd}	R_p	C_e	C_b
10990	10990	10990	10990	10990	10990
10991	10991	10991	10991	10991	10991
5251	5251	5251	5251	5477	5251
11295	11295	8433	11295	10932	11295
8433	8433	11295	8433	5251	8433
10932	10932	5477	5477	10928	4590
5477	4590	10932	10932	5476	10932
4590	5477	10928	10928	8433	5477
2230	2230	5476	2230	10927	2230
10928	2228	10927	2228	417	2228
2228	10928	2230	5476	11295	10636
5476	10636	2228	10927	2230	10726
10726	10726	417	4590	5875	10928
10636	5476	7803	10726	6819	7803
10927	7803	10726	7803	2228	6820

依次删除排名前 15 的节点,并分别记录每种方法网络抗毁性的变化,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出:删除 15 个节点后,本文方法和其他 5 种方法的网络抗毁性分别下降为 0. 148、0. 151、0. 151、

0.152、0.173 和 0.154；随着失效节点的增加，每种方法的网络抗毁性均逐渐下降，原因是失效节点可能会中断网络中的重要路径或通信链路，导致信息传输受阻或延迟，从而使得网络效率和自然联通度降低。

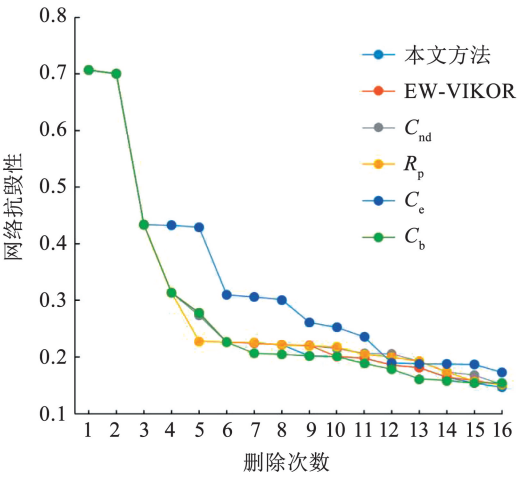


图 4　网络抗毁性变化曲线

Fig. 4　Variation curves of network invulnerability

删除 15 个节点后，每种方法网络抗毁性下降比例见表 2。

表 2　6 种方法网络抗毁性下降比例

Tab. 2　Percentage of network invulnerability reduction for six methods

方法	网络抗毁性下降比例/%
本文方法	**79.25**
EW-VIKOR	78.94
C_{nd}	78.65
R_p	78.57
C_e	75.57
C_b	78.27

由表 2 可以看出，本文方法在“22Feb2017. services. edges”数据集上删除 15 个节点后，网络抗毁性的下降比例达到了 79.25%，相较于其他 5 种方法，分别高出了 0.31%、0.60%、0.68%、3.68% 和 0.98%，说明本文方法能更有效地识别对网络影响较大的节点，在定位 Tor 网络关键节点方面具有更高的准确性，能够高效准确地完成节点重要度评估任务。

4　结　论

1）本文提出的基于改进 ELECTRE 算法的 Tor 网络节点重要度评估方法可以很好地解决使用传统 ELECTRE 算法在面对大量备选方案时，计算聚合优势矩阵导致的各方案之间的差别不明显，难以判断优劣的问题；提高了节点排序结果的精度，且不需要计算阈值，简化了计算过程。

2）提出了一种网络抗毁性的新型简化算法，利用网络效率、自然连通度和极大连通子图实现了对节点重要度计算方法的准确评价。

3）在公开数据集上进行的对比实验得出，本文方法的网络抗毁性下降比例达到了 79.25%；与对比方法相比，网络抗毁性的下降比例分别高出了 0.31%、0.60%、0.68%、3.68% 和 0.98%，说明本文方法在判断节点重要度方面优于对比方法，准确性更高。

参考文献

[1] Dingledine R, Mathewson N, Syverson P. Tor: the second-generation onion router[C]//13th USENIX Security Symposium. San Diego: USENIX Association, 2004: 21. DOI: 10.21236/ada465464

[2] Barratt M J. Silk road: ebay for drugs[J]. Addiction, 2012, 107(3): 683. DOI: 10.1111/j.1360-0443.2011.03709.x

[3] Arp D, Yamaguchi F, Rieck K. Torben: a practical side-channel attack for deanonymizing Tor communication[C]//Proceedings of the 10th ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security. Singapore: ACM, 2015: 597. DOI: 10.1145/2714576.2714627

[4] Biryukov A, Pustogarov I, Weinmann R P. Trawling for Tor hidden services: detection, measurement, deanonymization[C]//34th IEEE Symposium on Security and Privacy. San Francisco: IEEE, 2013: 80. DOI: 10.1109/SP.2013.15

[5] 徐俊杰. 匿名通信网络 Tor 的实现原理及攻击技术研究[J]. 网络安全技术与应用, 2021(9): 1
Xu Junjie. Research on the realization principle and attack technology of anonymous communication network Tor[J]. Network Security Technology & Application, 2021(9): 1

[6] Biryukov A, Pustogarov I, Thill F, et al. Content and popularity analysis of Tor hidden services[C]//2014 IEEE 34th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Madrid: IEEE, 2014: 188. DOI: 10.1109/ICDCSW.2014.20

[7] Spitters M, Verbruggen S, Staalduinen M V. Towards a comprehensive insight into the thematic organization of the Tor hidden services[C]//2014 IEEE Joint Intelligence and Security Informatics Conference. The Hague: IEEE, 2014: 220. DOI: 10.1109/JISIC.2014.40

[8] De Domenico M, Arenas A. Modeling structure and resilience of the dark network[J]. Physical Review E, 2017, 95(2): 022313. DOI: 10.1103/PhysRevE.95.022313

[9] Bernaschi M, Celestini A, Guarino S, et al. Exploring and analyzing the Tor hidden services graph[J]. ACM Transactions on the Web, 2017, 11(4): 24. DOI: 10.1145/3008662

[10] Alharbi A, Faizan M, Alosaimi W, et al. Exploring the topological properties of the Tor dark web[J]. IEEE Access, 2021, 9: 21746. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3055532

[11] Bernaschi M, Celestini A, Cianfriglia M, et al. Onion under microscope: an in-depth analysis of the Tor web[J]. World Wide Web, 2022, 25(3): 1287. DOI: 10.1007/s11280-022-01044-z

[12]潘逸涵, 张爱新. 基于深度学习的Tor流量识别方法[J]. 通信技术, 2019, 52(12): 2982
Pan Yihan, Zhang Aixin. Tor traffic identification based on deep learning[J]. Communications Technology, 2019, 52(12): 2982. DOI:10.3969/j.issn.1002-0802.2019.12.026

[13]Rao Zhihong, Niu Weina, Zhang Xiaosong, et al. Tor anonymous traffic identification based on gravitational clustering[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2018, 11(3): 592. DOI: 10.1007/s12083-017-0566-4

[14]Shapira T, Shavitt Y. FlowPic: encrypted internet traffic classification is as easy as image recognition[C]//2019 INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Paris: IEEE, 2019: 680. DOI: 10.1109/INFCOMW.2019.8845315

[15]Govindan K, Jepsen M B. ELECTRE: a comprehensive literature review on methodologies and applications[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 250(1): 1. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.07.019

[16]Zabihimayvan M, Sadeghi R, Doran D, et al. A broad evaluation of the Tor english content ecosystem[C]//Proceedings of the 11th ACM Conference on Web Science. Boston: ACM, 2019: 333. DOI: 10.1145/3292522.3326031

[17]Takaaki S, Atsuo I. Dark web content analysis and visualization[C]//5th ACM International Workshop on Security and Privacy Analytics. Richardson: ACM, 2019: 53. DOI: 10.1145/3309182.3309189

[18]Ghosh S, Das A, Porras P, et al. Automated categorization of onion sites for analyzing the darkweb ecosystem[C]//Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Halifax: ACM, 2017: 1793. DOI: 10.1145/3097983.3098193

[19]Lalou M, Tahraoui M A, Kheddouci H. The critical node detection problem in networks: a survey[J]. Computer Science Review, 2018, 28: 92. DOI: 10.1016/j.cosrev.2018.02.002

[20]Wang Ning, Gao Ying, He Jiatao, et al. Robustness evaluation of the air cargo network considering node importance and attack cost[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2022, 217: 108026. DOI: 10.1016/j.ress.2021.108026

[21]Ruan Yirun, Tang Jun, Wang Haoran, et al. Method for measuring node importance in complex networks based on local characteristics[J]. International Journal of Modern Physics B, 2021, 35(22): 2150231. DOI: 10.1142/S0217979221502313

[22]Luo Juanjuan, Feng Yinghui, Zuo Chao. Analysis on the invulnerability of network based on scale-free network[C]//3rd IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing: IEEE, 2018: 1519. DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577931

[23]Zhang Junlong, Luo Yu. Degree centrality, betweenness centrality, and closeness centrality in social network[C]//2nd International Conference on Modelling, Simulation and Applied Mathematics (MSAM2017). Bangkok: Atlantis Press, 2017: 300. DOI: 10.2991/msam-17.2017.68

[24]Zhu Darui, Wang Haifeng, Wang Rui, et al. Identification of key nodes in a power grid based on modified pagerank algorithm[J]. Energies, 2022, 15(3): 797. DOI: 10.3390/en15030797

[25]Agryzkov T, Tortosa L, Vicent J F, et al. A centrality measure for urban networks based on the eigenvector centrality concept[J]. Environment and Planning B-Urban Analytics and City Science, 2019, 46(4): 668. DOI: 10.1177/2399808317724444

[26]Liu Weiyan, Li Xin, Liu Tao, et al. Approximating betweenness centrality to identify key nodes in a weighted urban complex transportation network[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 2019: 9024745. DOI: 10.1155/2019/9024745

[27]Zhu Yuxin, Tian Dazhuo, Yan Feng. Effectiveness of entropy weight method in decision-making[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020: 3564835. DOI: 10.1155/2020/3564835

[28]秦进, 贺钰昕. 定量化交通网络效率评价方法比较[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 111
Qin Jin, He Yuxin. Evaluation methods comparison of quantitative transportation network efficiency[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 111. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.02.012

[29]沈安慰, 郭基联, 王卓健. 基于自然连通度的复杂网络节点重要性度量方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(5): 52
Shen Anwei, Guo Jilian, Wang Zhuojian. Research of complex networks node importance ranking based on natural connectivity[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(5): 52. DOI: CNKI:SUN:HLYZ.0.2017-05-012

[30]Chen Xuhang, Wang Xueyan, Jia Xiaotao, et al. Accelerating graph-connected component computation with emerging processing-in-memory architecture[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022, 41(12): 5333. DOI: 10.1109/TCAD.2022.3163628

[31]Yang Yuanzhi, Yu Lei, Wang Xing, et al. A novel method to evaluate node importance in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 526: 121118. DOI: 10.1016/j.physa.2019.121118