



基于级联失效的有向无标度网络节点重要度评价模型

刘浩然, 王星淇, 邓玉静, 覃玉华
(燕山大学, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 为了准确评价有向无标度网络中节点的重要度大小, 从而更好地实施保护策略, 提高网络抗毁性。考虑网络发生级联失效前后, 节点负载量和网络连通性的变化情况, 提出一种基于级联失效的有向无标度网络节点重要度评价模型。首先建立有向网络级联失效模型, 推导出节点失效前承担的负载量, 然后结合节点负载与其在数据传输过程中的位置因素, 构建节点重要度评价模型。实验结果表明, 在网络遭受选择性攻击时, 采用该模型测得的关键节点失效后, 分离生成子图数量和网络稳健性的变化趋势更明显, 为具体应用提供实验数据。

关键词: 无线传感网络; 有向无标度; 节点重要度; 级联失效; 评价矩阵

中图分类号: TP393, TP212

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020042

Evaluation model of node importance in directed scale-free network based on cascade failure

LIU Haoran, WANG Xingqi, DENG Yujing, QIN Yuhua
Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China

Abstract: In order to evaluate the importance of nodes in a directed scale-free network accurately, the protection strategy can be better implemented and the destruction resistance of the network can be improved. Considering the changes of node load and network connectivity before and after cascading failure, a directed scale-free network node importance evaluation model based on cascading failure was proposed. Firstly, a cascading failure model of directed network was established to deduce the load of nodes before failure. Then, a node importance evaluation model was constructed by combining the node load and its location during data transmission. Experimental results show that when the network is attacked selectively, the number of generated sub-graphs and the network robustness change more obviously after the failure of key nodes measured by the model, providing experimental data for specific applications.

Key words: wireless sensor network, directed scale-free, node importance, cascade failure, the evaluation matrix

1 引言

无线传感器网络^[1]因其自组织连接、适应性

强、能耗低等特点被广泛应于水下探测^[2]、智慧工厂^[3]、农场管理^[4]、万物互联^[5]等各个领域。由于节点间信息传输的方向性, 生活中绝大部分网



络符合有向无标度网络特征,同无向网络相比,有向网络的节点负载、容量及发生级联失效后向上下游节点的数据反馈情况均有差异,以有向网络为基础的相关研究也更符合现实意义。有向网络中关键节点的失效会影响周围邻居节点的运行,甚至导致整个网络的瘫痪,因此,有向网络在面对选择性攻击时的抗毁性减弱。准确有效的关键节点判定方法可以为保护重要节点,提升网络抗毁性提供良好的理论依据,因此,如何建立良好的节点重要度模型是学者关注的热点问题。

近几年大量学者从不同研究角度出发,提出了许多针对无标度网络的节点重要度评价方法。Chiman 等^[6]利用节点中心性,通过找到各群体中关键节点并计算彼此最短路径之和对重要节点进行排序,但该方法仅适用于大规模网络且重要节点的检测指标单一。Jiang 等^[7]提出包括目标攻击、随机失效、基于中间值的攻击等 8 种攻击机制,并通过重新计算不同网络中每个节点删除策略的度量来判定重要节点群。该方法考虑因素繁多,对于不同网络的不同特点缺乏针对性。Kashyap G 等^[8]运用随机删除链路和目标节点间中心性和度的删除等策略对网络进行分解,以此评价重要节点。该方法通过破坏网络中的关键链路检测重要节点,具有一定的局限性。Alireza^[9]从结构和属性的角度,利用节点的重要度、收敛程度和拓扑势场对节点进行估计,提出一种基于节点重要度分析的多目标属性社区检测算法。该方法依赖于属性信息和全局搜索,存在陷入局部最优的问题,且计算量大,运行时间长。Yu 等^[10]提出一种基于改进结构孔的重要节点识别方法。该方法对传统结构孔进行改进,降低了计算复杂度,对于网络中特别是桥节点等重要节点的评价具有一定准确性。Zhu 等^[11]结合结构洞理论和节点中心性,建立了节点重要度评价矩阵,该矩阵包含了节点的局部和全局信息,可以准确评价节点。Wen 等^[12]通过计算层次分析法的评价结果和三个计算量简

单的指标之间映射规则,提出了一种基于最小二乘支持向量机的重要节点评价方法,该方法减少了计算复杂度,且提高了评价效率。

以上方法虽从不同角度评价关键节点,但都没有考虑无标度网络遭受攻击后,重要节点的失效对网络造成的破坏这一因素,即级联失效。Yang 等^[13]采用一系列具有一定参数范围的尺度树网络来评估网络的稳健性,并提出了一种基于链路的稳健性指标。Wang 等^[14]针对蓄意攻击和级联故障的综合顽健网络缺少有效优化算法的问题,设计了一种归一化评价测度,继而设计了一种多智能体遗传优化算法。由此可见,级联失效对于网络稳健性的影响是不可忽略的,而稳健性的强弱与关键节点的判定密切相关。因此,将级联失效前后网络的变化考虑到重要节点评价因素中,能进一步提高评价方法的准确性和有效性。Ryan 等^[15]研究了一个节点的单次失效所导致的失效节点数与中心性度量之间的相关性。吴佳键等^[16]针对相依网络上的级联失效问题,利用共同边界节点在极大连通网络内外的连接边数计算边界节点的重要度,提出一种基于相连边的择优恢复算法(preferential recovery based on connectivity link, PRCL),能有效缓解和恢复级联失效导致的影响。

但是,上述参考文献均没有考虑级联失效前后节点负载量和网络连通性两种因素。因此,本文分析有向无标度网络级联失效前后网络结构和节点属性的变化情况,再结合节点自身负载和网络连通效率两种评价指标构建一种基于级联失效的有向无标度网络节点重要度评价模型。该模型相对于其他关键点检测算法,可靠性更强,评价结果更加准确。

2 级联失效下负载分配模型

2.1 初始负载

WSN 中节点初始负载与其出入度相关,在已有研究^[17]中,大多表明二者成线性幂指数关系。

本文加入信息传输的方向性,重新定义有向网络节点初始负载,定义如下:

$$L_i^0 = \alpha(k_{in} + k_{out})^\tau, \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

其中, L_i^0 表示节点的初始负载, k_{in} 表示节点入度, k_{out} 表示节点出度; α 和 τ 为负载可调参数,共同控制着节点的初始负载,且 $\alpha > 0$, N 为网络中节点总数。

2.2 节点容量

本文根据 ML 模型^[18],考虑现实网络成本的限制,节点的容量不可能无限增大。采用按需分配的原则,使节点的容量与节点初始负载成正比关系。通过适度增大节点容量降低节点超载失效的概率,提高整个网络抵御级联失效的能力。定义如下:

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

其中, C_i 表示节点 i 的容量, β 是可调参数,且 $\beta \geq 0$, L_i^0 是节点的初始负载, N 是网络中的节点总数。

2.3 负载重分配策略

根据经典无标度 BA 模型^[19]画出有向无标度网络中任意节点 i 的邻居网络图,如图 1 所示。通过节点间信息传递方向了解邻居节点相关信息。

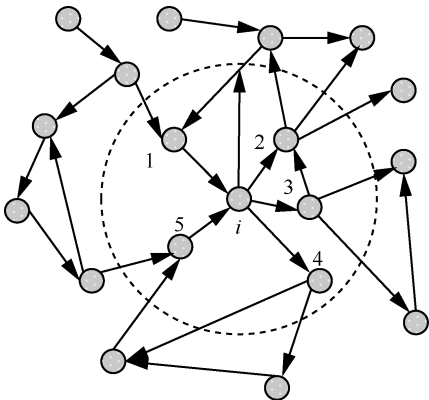


图1 有向网络拓扑结构及邻居区域图

设 A 为节点 i 的邻居入节点集合, B 为节点 i 的邻居出节点集合。图 1 中, 节点 i 的邻居节点为

1 号节点、2 号节点、3 号节点、4 号节点和 5 号节点, 可知, $A = \{1,5\}$, $B = \{2,3,4\}$ 。

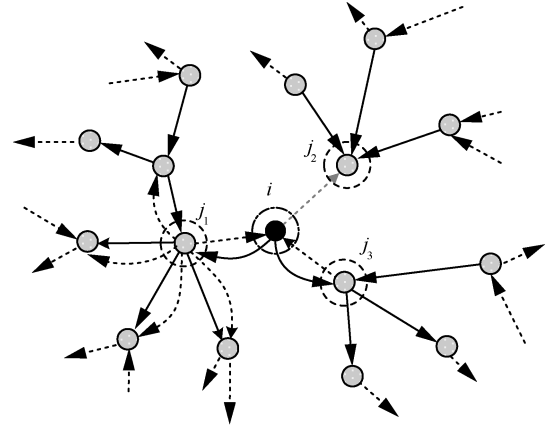


图2 有向网络级联失效后的负载重分配示意图

当节点 i 发生故障失效后, 节点 i 的负载不会凭空消失, 而是分配给网络中其他完好节点。有向网络级联失效后的负载重分配示意如图 2 所示, 在节点 i 因失效而停止数据传输后, 节点 i 停止接收父节点 j_1 和 j_3 传输的数据, 同时中断与子节点 j_2 的负载输出线路。此时, 节点 i 中的负载按照规定的负载重分配策略向父节点 j_1 和 j_3 返还相应比例的负载, 而邻居子节点 j_2 不再接收 i 的负载。被返还负载的父节点 j_1 和 j_3 因承担了超出其容量的负载而再次失效, 从而再次进行分配, 如此循环下去, 直到网络中不再出现节点超载的现象。

考虑到大多数复杂网络系统定义了固定的节点初始负载和容量, 有效的负载重分配策略既能保持现有网络物理特性, 又能提高其抵御级联失效的能力。采用基于节点容量和初始负载差值的方法定义负载重分配策略, 依据“能者多劳”原则, 按照父节点的信息传输能力分给其相应的负载, 可以降低父节点继续失效的概率, 计算式如下:

$$\Delta L_{ji} = L_i^0 \cdot \frac{C_j - L_j^0}{\sum_{n \in A} (C_n - L_n^0)} \quad (3)$$

其中, ΔL_{ji} 表示失效节点 i 上的负载重新分配到的其



邻节点 j 上的负载量, L_i^0 和 L_j^0 分别表示节点 i 和节点 j 的初始负载, C_j 表示节点 j 的容量。

将式 (1) 和式 (2) 代入式 (3) 中可得:

$$\begin{aligned}\Delta L_{ji} &= L_i^0 \cdot \frac{C_j - L_j^0}{\sum_{n \in A} (C_n - L_n^0)} = \\ L_i^0 \cdot \frac{(1 + \beta)L_j^0 - L_j^0}{\sum_{n \in A} ((1 + \beta)L_n^0 - L_n^0)} &= \\ L_i^0 \cdot \frac{\beta L_j^0}{\sum_{n \in A} \beta L_n^0} &= L_i^0 \cdot \frac{L_j^0}{\sum_{n \in A} L_n^0}\end{aligned}\quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 节点失效后分配给父节点的负载量取决于父节点的初始负载量和网络总负载量。分配负载量同父节点初始负载量成正比, 同网络总负载量成反比。

3 评价指标及重要度评价矩阵

关键节点的失效会导致网络发生级联失效, 由于节点传递负载量与其在网络中的位置不同, 导致级联失效前后, 节点负载量和网络连通性发生改变。通过结合级联失效前后节点自身负载量和网络连通性的变化值, 提出浸染度模型和连通效率概念, 构建一种无线传感器有向无标度网络节点评价矩阵模型。

3.1 浸染度模型

根据级联失效前后网络中负载量的变化情况构建浸染度模型。首先, 通过式 (4) 计算出节点自身接收的负载数据量 $\sum_{j \in A} \Delta L_{ji}$; 其次, 与发生级联失效后网络中总负载量的大小 $\sum_{i=1}^n L_i$ 相比, 构建浸染度模型:

$$I_i = \frac{\sum_{j \in A} \Delta L_{ji}}{\sum_{i=1}^n L_i} = \frac{\sum_{j \in A} L_i^0 \frac{L_j^0}{\sum_{n \in A} L_n^0}}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (5)$$

其中, ΔL_{ji} 表示失效节点 i 上的负载重新被分配到其邻节点 j 上的负载量, L_i 是节点 i 的负载, A 为

级联失效前将数据传输给节点 i 的邻居父节点。由式 (5) 可以看出, 节点浸染度的大小同自身接收的负载量成正比, 同级联失效后网络总负载量成反比。节点接收信息量越大, 失效后其父节点承担的负载量越大, 失效概率越大, 网络破坏程度随之增大, 剩余网络中的总负载量较小, 因此该节点浸染度较大。

3.2 连通效率

网络中节点 i 和节点 j 之间最短路径的变化会影响整个网络的平均路径长度, 导致网络连通性的变化。在有向网络中, 同时考虑出边和入边, 连通效率表示为:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{i \neq j \in V} \frac{2}{d_{ij} + d_{ji}} \quad (6)$$

其中, N 表示网络中的节点总数。 d_{ij} 是方向为节点 i 到节点 j 的最短距离, 即节点 i 的入边; d_{ji} 是方向为节点 j 到节点 i 的最短距离, 即节点 i 的出边。 E 的取值范围是 $(0, 1]$, 当网络中只有一个节点时, $E = 0$; 当网络为全联通网络时, $E = 1$ 。

移除节点所造成的连通效率下降率为:

$$\mu_i = 1 - \frac{E'}{E_0} \quad (7)$$

其中, E' 是移除节点以后网络的效率, E_0 是网络的初始效率, 二者相差越大, 比值越小, 导致 μ_i 越大, 说明移除节点 i 对整个网络越重要。

3.3 基于连通效率的贡献度矩阵

复杂网络中任何一个节点都并非孤立存在, 而是受网络其他节点的约束和影响。其他无论是邻接节点, 还是非邻接节点, 与该节点间的相互作用关系都可以采用节点间重要度贡献的形式进行描述。对于某一给定节点, 如果非邻接节点的重要度贡献大于邻接节点的贡献, 那么在计算节点重要度贡献时需要将非邻接节点的重要度贡献考虑在内, 再结合网络的邻接矩阵 $Q_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 2a_{12} \frac{\mu_2}{d_{21} + d_{12}} & \cdots & 2a_{1n} \frac{\mu_n}{d_{n1} + d_{1n}} \\ 2a_{21} \frac{\mu_1}{d_{12} + d_{21}} & 1 & \cdots & 2a_{2n} \frac{\mu_n}{d_{n2} + d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2a_{n1} \frac{\mu_1}{d_{1n} + d_{n1}} & 2a_{n2} \frac{\mu_2}{d_{2n} + d_{n2}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)矩阵中的元素 $(\mathbf{G})_{ij} = 2a_{ij} \frac{\mu_j}{d_{ji} + d_{ij}}$, 表示

网络中节点 j 对节点 i 的重要度贡献值, 两节点之间最短路径越大, 节点之间贡献值越小; 当两节点之间不连通时, 最短路径为无穷大, 二者之间相互的贡献值均为 0。对角线上的数表示节点对自身的重要度贡献比例值为 1。

3.4 节点重要度评价模型

将之前由连通效率构造的节点间贡献度矩阵 $\mathbf{G}$ 与由节点负载构成的浸染度模型 $\mathbf{I}$ 结合, 构建节点重要度评价矩阵 $\mathbf{J}$, 即由贡献度矩阵 $\mathbf{G}$ 同浸染度模型矩阵 $\mathbf{I}$ 相乘得到, 该矩阵同时考虑网络整体通信能力和网络中节点的负载传输能力两种因素, 所构矩阵如下:

$$\mathbf{J} = \mathbf{G} \times \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 2a_{12} \frac{\mu_2}{d_{21} + d_{12}} & \cdots & 2a_{1n} \frac{\mu_n}{d_{n1} + d_{1n}} \\ 2a_{21} \frac{\mu_1}{d_{12} + d_{21}} & 1 & \cdots & 2a_{2n} \frac{\mu_n}{d_{n2} + d_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2a_{n1} \frac{\mu_1}{d_{1n} + d_{n1}} & 2a_{n2} \frac{\mu_2}{d_{2n} + d_{n2}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & 2a_{12} \frac{\mu_2}{d_{21} + d_{12}} I_2 & \cdots & 2a_{1n} \frac{\mu_n}{d_{n1} + d_{1n}} I_n \\ 2a_{21} \frac{\mu_1}{d_{12} + d_{21}} I_1 & I_2 & \cdots & 2a_{2n} \frac{\mu_n}{d_{n2} + d_{2n}} I_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2a_{n1} \frac{\mu_1}{d_{1n} + d_{n1}} I_1 & 2a_{n2} \frac{\mu_2}{d_{2n} + d_{n2}} I_2 & \cdots & I_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

将评价矩阵 $\mathbf{IM}$ 中的每一行元素相加可得:

$$\mathbf{IM} = \begin{bmatrix} I_1 + 2a_{12} \frac{\mu_2}{d_{21} + d_{12}} I_2 + \cdots + 2a_{1n} \frac{\mu_n}{d_{n1} + d_{1n}} I_n \\ 2a_{21} \frac{\mu_1}{d_{12} + d_{21}} I_1 + I_2 + \cdots + 2a_{2n} \frac{\mu_n}{d_{n2} + d_{2n}} I_n \\ \vdots \\ 2a_{n1} \frac{\mu_1}{d_{1n} + d_{n1}} I_1 + 2a_{n2} \frac{\mu_2}{d_{2n} + d_{n2}} I_2 + \cdots + I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{IM}_1 \\ \mathbf{IM}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{IM}_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{IM}_i$ 即节点 i 的重要度值。从式(10)可以看出, 节点在网络中承担工作任务的重要程度取决于自身的浸染度和连通效率。节点接收和传输负载的能力越大, 与其他节点之间的连接越紧密, 在网络中越占据重要地位, 失效后发生级联失效的概率越大, 波及范围越广, 该节点的重要度越大。

4 算法流程及复杂度分析

4.1 算法流程

通过计算节点自身传输负载量及网络发生级联失效之后各个节点之间的信息关联程度, 构建贡献度矩阵, 分别从节点传递数据的能力和在网络中的位置两方面评价其重要度。

已知复杂网络的邻接矩阵 $\mathbf{Q}_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$, 下面给出评估节点重要度的具体算法步骤。

步骤 1 通过节点出入度和级联失效模型相关式(1)、式(2)、式(3)、式(4)计算出节点所接收的负载量 $\sum_{j \in A} \Delta L_{ji}$ 。

步骤 2 计算剩余网络的总负载量, 代入式(5)中, 求出浸染度模型 I_i 。

步骤 3 通过计算网络中各个节点之间的最短路径, 根据式(6)和式(7)得出连通效率下降率 μ_i , 再结合邻接矩阵 $\mathbf{Q}_{n \times n} = (a_{ij})_{n \times n}$, 列出由各节点之间影响关联程度构成的贡献度矩阵 $\mathbf{G}$ 。

步骤 4 将贡献度矩阵 $\mathbf{G}$ 中第 i 列都乘以相应的浸染度模型 I_i , 作为节点的重要度矩阵 $\mathbf{J}$ 的



第 i 列,再代入式(10),所得结果作为该节点的重要度 $\mathbf{IM}_i$,最后对重要度进行大小排序。

4.2 复杂度分析

在拥有 n 个节点的无标度网络中进行复杂度分析。根据步骤1需要计算网络发生级联失效时,各个节点所接收的负载量的大小,由于每个节点最多需要被计算 n 次, n 个节点的算法复杂度为 $o(n^2)$;步骤2计算所有节点浸染度模型的复杂度为 $o(n)$;步骤3统计得出贡献度矩阵的算法复杂度为 $o(n^2)$;因为重要度评价矩阵由浸染度模型矩阵和贡献度矩阵相乘得出,所以根据步骤4统计得出重要度评价矩阵的算法复杂度为 $o(n^3)$,综上所述,本文所提关键节点判定算法的复杂度为 $o(n^3)$ 。

5 实验仿真

为了进一步验证节点重要度评价矩阵模型的有效性和准确性,本节选取了3个具有代表性的有向拓扑网络关键节点重要度评估方法同本文模型进行对比,包括删除链路法、LS-SVM模型法和MANIA检测算法,运用MATLAB仿真工具进行对比仿真,且3种算法复杂度同本文算法相同,均为 $o(n^3)$ 。对比参数为节点重要度排序结果、最大连通子图数量和网络稳健性。节点随机分布在 $200\text{ m}\times 200\text{ m}$ 的方形区域,取50次实验结果的平均值为最终结果,仿真环境参数见表1。有向网络拓扑结构如图3所示。

表1 实验环境参数

参数	数值
分布区域	$200\text{ m}\times 200\text{ m}$
节点个数(N)	100
节点最大传输半径/ m	40
负载可调参数 α	0.4
负载可调参数 τ	1.6
容量可调参数 β	0.12

5.1 模型仿真及结果

根据实验环境参数,仿真出无线传感器有向网络拓扑,再算出各节点的浸染度 I_i 和连通效率 μ_i ,运用本文提出的节点重要度评价模型得出各节点重要度值,如图4所示。

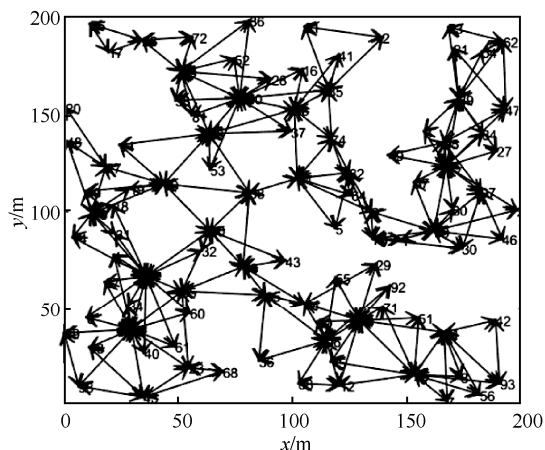


图3 有向网络拓扑结构

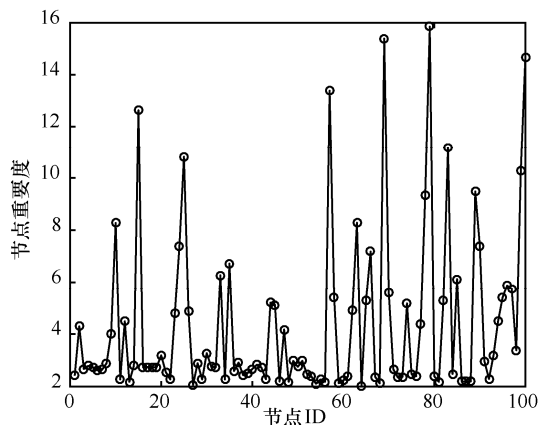


图4 节点重要度值

从图3和图4中可看出,网络中出入度较大且靠近网络中心区域的节点,其重要度较大,引发级联效应导致前后网络差异性较大,例如节点15、节点57、节点69、节点79、节点83和节点100均是既承担大量信息传输任务又占据着重要位置的节点。网络中出入度较小且位于网络边缘的节点,其失效前后网络变化不大,节点浸染度和连通效率极小,节点重要度值几乎为零,符合本文评价矩阵方法中考虑的负载和位置因素。

5.2 方法对比验证

根据所构建的有向网络拓扑图，分别利用删除链路法、LS-SVM 模型法和 MANIA 检测算法得出各个节点重要度值，并由大到小排列出前 10 个关键节点进行对比，对比结果见表 2。

从表 2 可以看出,4 种方法以图 3 节点分布位置为基础得到的节点重要度值有所不同，删除链路法、LS-SVM 模型法和 MANIA 检测算法得出结果极为相似，均测得 100 号节点和 57 号节点最重要，分析图 3 中节点可发现，虽然两节点出入度较大，但在网络中并没有处于至关重要的位置；而图中 79 号节点和 69 号节点，既拥有较强的负载传输能力，同时处于连接其他关键节点的重要位置，二者失效会极大概率令周围关键节点崩溃，导致网络瘫痪。这是因为本文构建的评价矩阵模型在考虑级联失效的同时还兼顾了节点自身能力及其在信息传输中位置的重要度，比其他 3 种算法考虑因素更全面，评价结果也更具准确性和有效性。

5.3 选择性攻击下的性能对比

为了进一步验证评价所选关键节点对网络产生级联失效的影响，本文按顺序移除各评价方法

前 10%的关键节点，通过生成最大连通子图数量和网络稳健性两个指标来体现本文方法所选关键节点的准确性，分别如图 5、图 6 所示。

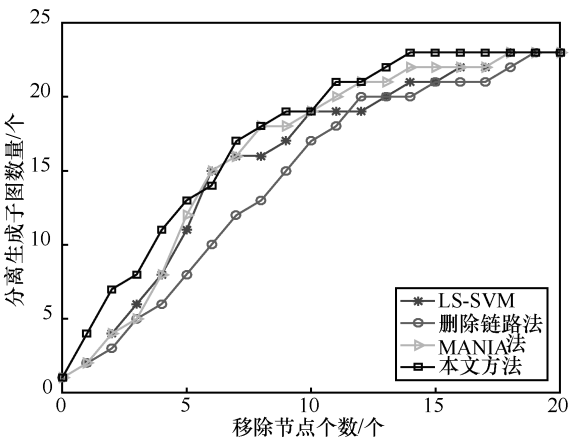


图 5 分离生成子图数量对比图

由图 5 可以看出，在移除前 5 个关键节点的前提下，依次移除本文算法所测得的关键节点导致网络分离生成子图数量均大于其他 3 种算法，而后生成速率相对缓慢，在移除第 14 个关键节点时，子图数量达到最大值 23 个，其余 3 个算法所得关键节点失效后对网络造成的破坏程度较小，连通性下降较缓慢。说明本文方法对于关键节点的判定更具有准确性和有效性。

表 2 节点重要度排序对比结果

节点 ID	节点重要度值							
	本文算法	排名	删除链路法	排名	LS-SVM 模型法	排名	MANIA 检测算法	排名
79	15.852	1	0.98	4	0.177	6	4.86	3
69	15.392	2	0.97	5	0.181	4	4.60	5
100	14.676	3	1.0	1	0.184	1	4.98	1
57	13.385	4	0.99	2	0.182	2	4.96	2
15	12.634	5	0.94	8	0.169	9	3.80	7
83	11.182	6	0.99	2	0.182	2	4.68	4
25	10.811	7	0.95	7	0.173	7	4.15	6
99	10.284	8	0.97	5	0.179	5	3.50	8
89	9.480	9	0.93	9	0.170	8	3.50	8
78	9.329	10	0.93	9	0.164	10	3.50	8

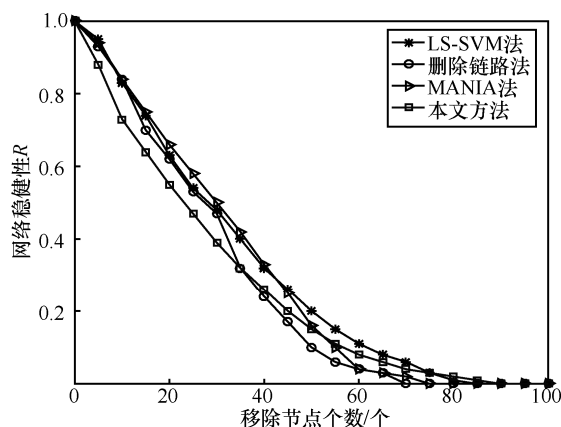


图6 网络稳健性对比图

随后又对比了在 100 个节点的有向无标度网络中, 不同算法下网络稳健性 R 随选择性移除关键节点数量的变化, 网络稳健性是指网络发生级联失效前后网络中有效节点数量的比值, 定义为 $R = \frac{N'}{N}$ 。

由图 6 可以看出, 网络稳健性与移除关键节点个数成反比, 且随着移除节点个数的增加, 下降速率减小, 这是由于被移除的节点在网络中的重要度越来越低, 失效前后网络变化越来越小。相比之下, 利用本文方法检测出的关键节点, 其失效后导致网络中有效节点数量的减少速率更大, 对网络影响更大, 在同一网络中, 稳健性的降低趋势比其他 3 种方法更明显, 网络结构瓦解得更快速。

上述对比方法分别从链路和节点数量两方面验证了本文方法相比于其他 3 种典型算法的准确性和有效性。依据此模型对网络中的关键节点进行有针对性的隐私保护, 可以全面抵御和缓解网络遭受蓄意攻击而引发级联失效。

6 结束语

针对有向无标度网络中关键节点的判定方法准确性和有效性不高的问题, 本文考虑网络级联失效条件下, 节点自身负载传输能力和节点位置两种因素, 提出了有向无标度网络节点重要度评价矩阵模型, 并通过实验验证了级联

失效前后分离生成子图数量和网络稳健性差异性。仿真结果显示, 按照该模型得出的重要节点依次进行选择性攻击, 分离生成子图数量和网络稳健性变化明显, 对网络结构影响大, 说明了本文提出的评价矩阵模型可以准确地判定关键节点, 为保护重要节点, 提高网络抗毁性等问题提供有效的帮助。

参考文献:

- [1] POTDAR V, SHARIF A, CHANG E. Wireless sensor networks: a survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] KHAN A, ALI I, GHANI A, et al. Routing protocols for underwater wireless sensor networks: taxonomy, research challenges, routing strategies and future directions[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1619-1623.
- [3] 杨海波, 陈友荣, 刘半藤, 等. 一种优化网络生存时间的移动传感节点覆盖调度算法[J]. 电信科学, 2018, 34(5): 45-55.
YANG H B, CHEN Y R, LIU B T, et al. Coverage scheduling algorithm of mobile sensor nodes for optimizing network lifetime[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(5): 39-49.
- [4] OKADA H, SUZUKI K, KENJI T, et al. Avian influenza surveillance system in poultry farms using wireless sensor network[C]// Design Test Integration & Packaging of Memos/moems, May 5-7, 2010, Seville, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2010.
- [5] 蔡畅, 王亚芳, 苗兵梅, 等. 基于改进遗传算法的认知无线传感网动态频谱分配方案[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 85-93.
CAI C, WANG Y F, MIAO B M, et al. Dynamic spectrum allocation for cognitive radio sensor networks based on improved genetic algorithm[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 85-93.
- [6] SALAVATI C, ABDOLLAHPOURI A, MANBARI Z. Ranking nodes in complex networks based on local structure and improving closeness centrality[J]. Neurocomputing, 2018.
- [7] JIANG Z Y, ZENG Y, LIU Z H, et al. Identifying critical nodes' group in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019(514): 121-132.
- [8] KASHYAP G, AMBIKA G. Link deletion in directed complex networks[J]. arXiv: 1809.00296v1, 2018.
- [9] MOAYEDIKIA A. Multi-objective community detection algorithm with node importance analysis in attributed networks[J]. Applied Soft Computing, 2018.
- [10] YU H, CAO X, LIU Z, et al. Identifying key nodes based on improved structural holes in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017(486).
- [11] ZHU C, WANG X, ZHU L. A novel method of evaluating key

- nodes in complex networks[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2017(96): 43-50.
- [12] WEN X, TU C, WU M, et al. Fast ranking nodes importance in complex networks based on LS-SVM method[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018: S0378437118303947.
- [13] YANG Z, LIU J. Robustness of scale-free networks with various parameters against cascading failures[J]. Physica A, 2018(492): 628-638.
- [14] WANG S, LIU J. Designing comprehensively robust networks against intentional attacks and cascading failures[J]. Information Sciences, 2019(478): 125-140.
- [15] GHANBARI R, JALILI M, YU X. Correlation of cascade failures and centrality measures in complex networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2017: S0167739X17319507.
- [16] 吴佳键, 王聪, 王磊. 相依网络上基于相连边的择优恢复算法[J]. 物理学报, 2018, 67(8): 261-272.
- WU J J, WANG C, WANG L. Enhancing resilience of interdependent networks against cascading failures under preferential recovery strategies[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(8): 088901.
- [17] 尹荣荣, 刘彬, 刘浩然, 等. 无线传感器网络中无标度拓扑的动态容错性分析[J]. 物理学报, 2014, 63(11).
- YIN R R, LIU B, LIU H R, et al. Dynamic fault-tolerance analysis of scale-free topology in wireless sensor networks[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11).
- [18] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [19] 任俊亮, 申卯兴, 仝蕊, 等. 无尺度网络中降低相继故障规模的策略研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(33).
- REN J L, SHEN M X, TONG R, et al. Study of reducing size of cascading failures in scale-free network[J]. CEA, 2011, 47(33): 82-84.

[作者简介]



刘浩然 (1980-), 男, 博士, 燕山大学博士生导师、信息科学与工程学院光电子工程系系副主任, 主要研究方向为无线传感器网络、工业故障检测及预测。



王星淇 (1994-), 男, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



邓玉静 (1990-), 女, 燕山大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



覃玉华 (1996-), 男, 燕山大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。