

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105989

基于节点和链路容量的无线传感器网络级联故障研究*

贾立伟¹ 董西广² 魏里¹

(1.河南医学高等专科学校 郑州 451191; 2.河南工程学院 郑州 451191)

摘要:针对当前无线传感器网络(WSN)级联模型中流量指标无法正确反映WSN的汇聚特征,提出了一种受节点容量和链路容量限制的无线传感器网络级联模型。首先,在每个节点上根据新的度量方向介数对负载函数进行定义,并根据每个节点的拥塞状态定义过载函数。其次,通过构建网络级联抗毁性模型,使故障节点可在一定时间延迟后从故障状态恢复。最后,提出了一种路由恢复机制,可以有效改善网络级联故障的抗毁性,并进行了仿真对比测试。结果表明,节点公差系数 λ_n 的增大不能降低由级联故障引起的损害程度,但可以推迟级联过程的发生;链路公差系数 λ_l 越大,过载节点的比例将显著下降;所提方法可以帮助故障网络在较短时间内得到恢复,使网络状态更加稳定。

关键词:无线传感器网络;级联故障;抗毁性;链路容量;方向介数

中图分类号: TN918 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Research on cascading failures of wireless sensor networks based on node and link capacity

Jia Liwei¹ Dong Xiguang² Wei Li¹

(1. Henan Medical College, Zhengzhou 451191, China; 2. Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Aiming at the fact that the current flow indicators in the wireless sensor network (WSN) cascade model cannot correctly reflect the convergence characteristics of WSN, a wireless sensor network cascade model limited by node capacity and link capacity is proposed. First, the network load is redefined according to the new traffic index direction betweenness. Second, the network cascading survivability model is constructed so that the faulty node can recover from the fault state after a certain time delay. Finally, a route recovery mechanism is proposed, which can effectively improve the survivability of network cascading failures, and a simulation comparison test is carried out. The results show that the increase of the node tolerance coefficient λ_n cannot reduce the damage caused by the cascading failure, but it can delay the occurrence of the cascading process. The larger the link tolerance coefficient λ_l , the proportion of overloaded nodes will decrease significantly and the proposed method can help the faulty network to recover in a short time and make the network status more stable.

Keywords: wireless sensor network; cascading failure; survivability; link capacity; direction betweenness

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是一种由大量传感器节点通过无线方式协作检测感知和处理各种环境信息的分布式网络系统。通常无线传感器网络的运行环境多为无人值守模式,因此存在传感器节点能量耗尽、软硬件故障、故意攻击等风险^[1,2]。传感器节点故障将导致最初集成的网络拓扑结构进行重新划分,并降低网络的覆盖范围,甚至可能导致整个网络瘫痪^[3]。因此,如何建立高度抗毁性无线传感器网络是当前无线传感器网络研究

的重点^[4]。

现有的无线传感器网络抗毁性研究多从静态角度出发,研究移除点或边界对网络拓扑连通性与可用性的影响,并未考虑网络的动态过程。但在现实无线传感器网络中,网络拓扑结构的改变将会造成网络数据流的重新分配,导致网络通信负载发生动态变化。网络通信负载的更新可能由于过载而导致新的节点故障,从而触发新的级联故障。但当前无线传感器网络的级联模型主要侧重于节点容量对网络性能的研究,忽略了链路容量的影响,从而导致流量指标无法正确地反映无线传感器网络的汇聚特征^[5,6]。

收稿日期:2021-03-15

* 基金项目:河南省高等学校重点科研项目(16B520014)资助

针对无线传感器网络级联故障的抗毁性,国内外众多学者进行了大量研究。文献[7]指出传感器节点的流量负载与节点程度有关,但是由于模型忽略了节点在网络流量中的作用,其不能正确反映无线传感器网络的流量特征。在实际的无线传感器网络中,每个数据包都会生成传感器节点,并最终聚集在接收节点上,这使得网络流量以汇聚特征得以表现。文献[8]指出当传感器节点超出其负载能力时将过载,但是由于模型没有考虑无线链路的容量,从而无法揭示无线传感器网络级联过程的本质现象。

在无线传感器网络级联故障研究方面,文献[9]提出了一种负载-容量模型,该模型定义每个节点均拥有一定容量并承担相关负载,当节点发生失效行为时,该节点所承担的负载按照预设规则转移至网络中剩余其他节点,而其他节点也将可能因负载超出自身容量而导致失效,并引发新一轮的负载转移,后续诸如 CASCADE 模型、OPA 模型、DC-Flow 模型和 RENEW 模型等均是在负载-容量模型基础上发展而来的。现实世界中,不同类型网络所对应的级联故障情形各不相同,研究表明输配电网络、物流保障网络、交通网络及因特网等均具有明显的级联失效特征且彼此间具有明显的差异性。文献[10]根据节点可变负载与恒定容量等特点,针对 WSN 无标度拓扑展开研究,得到度分布指数和幂律系数与 WSN 容错性能呈正相关;文献[11]则在此研究基础上,借助概率母函数法求解 WSN 无标度拓扑级联失效的临界负载值。尽管现有 WSN 级联失效研究取得了一定成果,然而在现实情形中,由于受网络规模和能耗限制,多数 WSN 均采用典型的分簇结构进行数据采集与传递,现有的 WSN 级联失效研究对于此类情况并不适用。

鉴于此,本文建立了一种受节点容量和链路容量限制的无线传感器网络级联模型,旨在通过构建网络级联抗毁性模型,使故障节点可在一定时间延迟后从故障状态恢复,从而提高网络稳定性。首先,根据新的度量即方向介数在每个节点上重新定义负载函数,并根据每个节点的拥塞状态定义过载函数。其次,通过构建网络级联抗毁性模型,使故障节点可在一定时间延迟后从故障状态恢复。最后,通过对比仿真实验,验证了所提网络级联抗毁性建模与分析方法的可靠性。

1 问题描述

在不失一般性的前提下,提出了如图 1 所示的网络拓扑结构。由图 1 可知,该结构包括 300 个传感器节点,宿节点位于网络中心。在无线传感器网络中,传感器节点有两个任务:1)是传输由自身创建的数据包;2)是转发来自其他传感器节点的中继数据包,然后所有数据包最终聚集在宿节点。图 2 表示由 LEACH 生成的网络流量分布图,从图中可以看到接近宿节点的传感器节点具有更大的流量负载。图 3 表示由度和介数创建的网络流量分布图。

如图 3 所示,为度和介数生成的网络流量分布图。

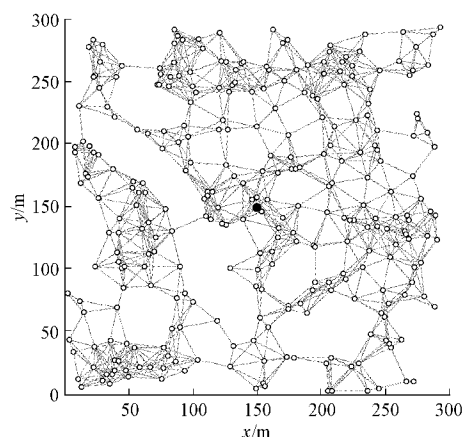


图 1 参考的网络拓扑

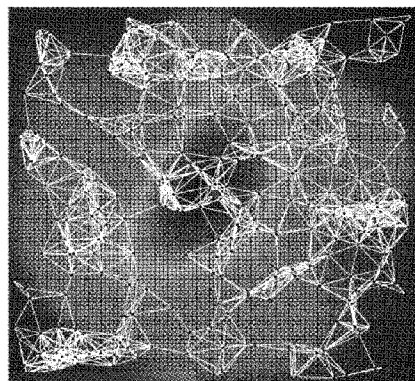
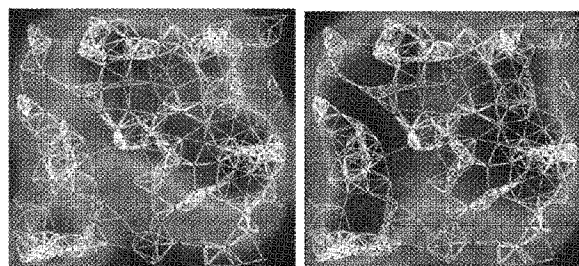


图 2 LEACH 路由协议生成的网络流量的分布



(a) 度 (b) 介数

图 3 网络流量分布图

图 3(a)中,传感器节点的连接越多,其负载往往越大,由此可知由节点度产生的流量分布只能反映邻近区域的流量交换;图 3(b)中,在网络中每对传感器节点之间维持大量最短路径的节点,将承受更大负荷的网络负载。因此,在基于网际网络的负载模型中,仅假设数据包是从一个传感器节点,传递到另一个传感器节点,而不是从源传感器节点传递到宿节点。

此外,当前 WSN 级联模型仅考虑了节点的容量,没有考虑链路受限的情况,而节点到链路的容量因素也会对 WSN 流量分布产生重要影响。而现有模型过于简化了负载和容量,导致获得结果与实际偏差较大。另外,现有模型

主要关注节点攻击引起的级联过程,实际上与由硬件故障引起的节点故障相比,WSN中的链路故障更常见。当发生链路故障时,链路负载将会重新分配,网络中的流量分配将得到更新,并且如果有任何传感器节点变为过载状态,级联故障将会继续,因此无线传感器网络的抗毁性评估是十分必要的。

2 方向介数原理

为正确反映 WSN 的流量特征,为 WSN 提出了一种新的流量度量“方向介数”,如式(1)所示^[12]。

$$C_i(t) = \frac{\sum_{j \in V} g_{i,j}(t)/g_j(t)}{N} \quad (1)$$

式中: $g_{i,j}(t)$ 为在时间 t 经过节点 i 从节点 j 到宿节点的最短路径数; $g_j(t)$ 为在时间 t 从节点 j 到宿节点的最短路径数; V 是除宿节点之外的节点集合; N 是除宿节点以外的传感器节点数。其中,方向之间的最极端情况为,从任何传感器节点到宿节点的最短路径中每条路径都会经过节点 i ,此时 $C_i(t)$ 将为最大值 1。当节点 i 位于网络边界,且没有节点要求它中继数据包时,其承担的负载只是其自身生成的数据包,此时 $C_i(t)$ 将为最小值 $1/N$ 。传统的介数主要用来量化一个节点沿着其他两个节点之间的最短路径的桥接次数,而方向介数是用来量化一个节点沿着所有其他节点到接收器节点之间的最短路径桥接次数。

在不失一般性的前提下,选择 WSN 中最常用的网络结构,如图 4 所示。表 1 为图 4 中通过度、介数和方向介数来测量的网络通信量。由图 4 可知,在该网络拓扑中,每个节点都必须经过节点 1 才能到达宿节点。因此,可以合理地认为整个网络流量将通过节点 1。除了自行生成的数据包外,还需要节点 2 和节点 3 分别中继来自 5 个节点的数据包。由此可知,几乎有一半的网络流量将通过节点 2 和节点 3,而其余传感器节点不承担任何中继任务,且其承担的唯一负载是自身负载。根据表 1 可知,方向介数完美地描述了上述流量分配功能,而度和介数都无法反映这一特征。

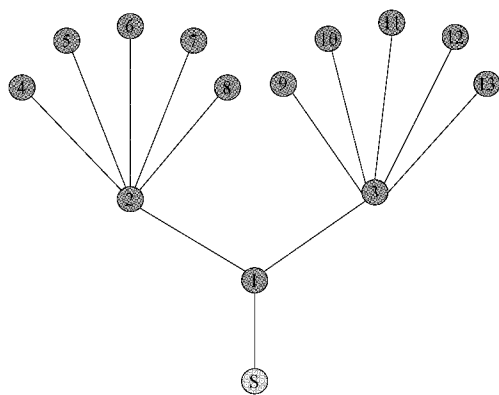


图 4 WSN 集群结构

表 1 网络流量分布

| 节点 | 度 | 介数 | 方向介数 |
|------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.230 | 0.615 | 1 |
| 2~3 | 0.461 | 0.641 | 0.5 |
| 4~13 | 0.069 | 0 | 0.071 |

如图 5 所示,为通过方向介数创建的网络流量的分布图。由图 5 可知,WSN 中的汇聚收敛功能与图 2 中的流量分布非常相似,表明无线传感器网络方向之间的合理性得到进一步验证。

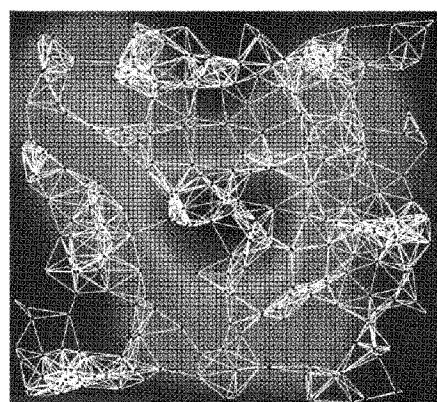


图 5 方向介数产生的网络流量分布

3 WSN 级联模型构建

3.1 网络负载

在无线传感器网络中大多数的传感器节点具有多个链路,这意味着它们需要处理来自其相邻节点的多路径数据流量。根据数据流的方向可以将其分类为两种类型:输入数据流量和输出数据流量。以图 4 所示的流量分布图为例,节点 2 具有 1、4、5、6、7 和 8 六个相邻的节点,分别接收来自相邻节点 4、5、6、7 和 8 的流量负载 D_{e24} 、 D_{e25} 、 D_{e26} 、 D_{e27} 、 D_{e28} 。由于这些数据流量将输入到节点 2 的缓存中,即定义为节点 2 的输入数据流量。节点 2 将流量负载 D_{e12} 传输到节点 1,并最终传输到宿节点,即流量负载 D_{e12} 可定义为从节点 2 到节点 1 的输出数据流量,也可以定义为节点 1 的输入数据流量。通常情况下,总的输入流量负载和自身负载应等于输出流量负载,但是当网络拓扑结构更改后,输出流量可能会小于输入流量负载和自身负载。在这种情况下数据包无法及时得到传输并会堆积在缓存中,经过多轮数据积累后节点最终将过载。

为了清楚地描述 WSN 的级联过程,节点 i 在时间 t 的负载 $L_i(t)$ 可表示如下^[13]:

$$L_i(t) = L_i(t-1) + L_i^S(t) + L_i^I(t) - L_i^O(t) \quad (2)$$

$$L_i^I(t) = \sum_{j \in A_i(t)} \lambda_{ij}(t) V_{ij}(t) \quad (3)$$

$$L_i^O(t) = \sum_{j \in A_i(t)} [1 - \lambda_{ij}(t)] V_{ij}(t) \quad (4)$$

$$V_{ij}(t) = \begin{cases} D_{eij}(t), & D_{eij}(t) \leq U_L \\ U_L, & D_{eij}(t) > U_L \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & j \in P_i(t) \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $L_i^i(t)$ 和 $L_i^o(t)$ 表示节点 i 在时间 t 的输入数据流量和输出数据流量。 L_i^s 表示节点 i 的自身负载。根据式(2)可知除了输入数据流量 $L_i^i(t)$ 和自身负载 L_i^s 之外，节点 i 也需要处理上一个时间单位内剩余的负载 $L_i(t-1)$ 。 $V_{ij}(t)$ 表示节点 i 和节点 j 之间的实际数据流量； $\lambda_{ij}(t)$ 表示方向系数，其目的是确定数据流 $V_{ij}(t)$ 到节点 i 的方向； $P_i(t)$ 表示最短路径中的节点到汇聚节点的集合，如果节点 j 属于 $P_i(t)$ ，则可以确定数据流 D_{eij} 为节点 i 的输出数据流量，否则数据流 D_{eij} 为节点 i 的输入数据流量； U_L 为链路容量，表示传感器节点中的带宽资源。显然不管对于输入数据流量或输出数据流量，其流量不能超过可用带宽； $\Omega_i(t)$ 表示相邻节点 i 的集合； $L_i^i(t)$ 表示每个相邻节点输入数据流量的总和。

3.2 网络容量

节点的容量与初始负载呈正相关关系，如式(7)所示^[14-15]。

$$W(i) = (1 + \alpha)L_i(0) \quad (7)$$

式中： α 表示过载公差系数， $L_i(0)$ 表示节点 i 的初始负载。但是在 WSN 中该设置与实际情况相差很大，出现这种情况，一方面是由于大多数情况下相同传感器网络的节点硬件配置是相同的，另一方面是由于在部署了数百甚至数千个传感器节点时无法自定义节点的容量。链路容量是影响 WSN 级联过程的关键因素，并且现有的所有研究都没有考虑 WSN 中链路容量因素的影响。因此本文定义节点容量 U_N 和链路容量 U_L 如式(8)和(9)所示。

$$U_L = (1 + \lambda_l) \frac{\sum_{e_{jk} \in E} D_{e_{jk}}(0)}{N} \quad (8)$$

$$U_N = (1 + \lambda_n) \langle k \rangle U_L \quad (9)$$

式中： λ_l 和 λ_n 分别表示链路公差系数和节点公差系数； $\langle k \rangle$ 表示网络初始平均程度。根据式(8)和(9)，每个传感器节点具有相同的链路容量和节点容量，且与初始方向介数的平均负载呈正相关关系。

3.3 级联机制

现有级联模型中，传感器节点具有正常和过载两种状态。根据假设，若节点负载超过其容量负载，则该节点将从网络中永久删除。该假设在诸如电网的网络中是合理的，如在电网中若节点（即变电站）的电力负载超过其额定容量，则可能由于硬件损坏而瘫痪。在这种情况下，无需人工干预即可将节点故障视为不可逆故障，但在无线传感器网络中，这种假设并不现实。不同于电网中的电力过载，WSN 中消息包的过载不会对传感器节点造成物理损坏。当流量负载足够大时，越来越多的数据包将无法及时传递，

并且随着时间的推移会在许多中央节点上进行积累，从而出现流量拥塞，导致负载超过其数据处理能力的节点无法正常运行。在本文模型中，除“正常”和“过载”外，传感器节点还可能出现“拥塞”或“隔离”。因此，需要首先为每个传感器节点定义一个拥塞函数，如式(10)所示。

$$f_i(t) = \begin{cases} 0, & L_i(t) < (1-\beta)W(i) \\ \frac{L_i(t) - (1-\beta)W(i)}{W(i) - (1-\beta)W(i)}, & (1-\beta)W(i) \leq L_i(t) \leq W(i) \\ 1, & L_i(t) > W(i) \end{cases} \quad (10)$$

式中： β 是拥塞的容忍系数，表示正常状态和拥塞状态间的调整阈值，其值与传感器节点的资源有关。

当 $L_i(t) < (1-\beta)W(i)$ 时，该节点处于正常状态，表明传感器可以正常工作。当 $L_i(t)$ 处于 $[(1-\beta)W(i), W(i)]$ 范围内时，该节点处于拥塞状态，表明传感器仍可以接收和发送数据包，但其处理能力将会相应减弱。当 $L_i(t) > W(i)$ ，该节点处于过载状态，表明该节点暂时无法运行。在该状态下，节点将被赋予恢复时间 Δt 。

在 Δt 时间内，该节点无法接收、处理和传输数据包，且缓存中的现有数据包也将被清除。当 Δt 过期时，该节点将再次变为正常状态。实际上，可以将 t 视为过载节点，并重新启动所需的时间。在实际的 WSN 中，传感器节点将在过载时重新启动而不是永久删除，且缓存也将被清除。重新启动完成后，传感器节点将加入网络并正常运行，对无线传感器网络的级联过程具有重大影响。当 Δt 接近 0 时，表明过载节点可以立即恢复，因此由过载引起的损害将最小化；若 Δt 接近 ∞ ，则所提级联方案等效于传统的永久删除方案。若节点的所有邻居都过载，即使其负载在容量范围内，由于该节点与宿节点之间的传递路径被切断，仍无法将数据包传输到宿节点，此时此类节点被称为隔离节点。当部分相邻节点从过载中恢复，并且到宿节点的有效路径出现时，隔离的节点可以被修复。如图 6 所示，为级联过程中传感器节点的状态转换图。

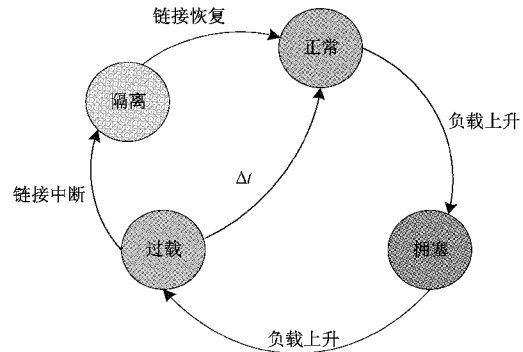


图 6 级联过程中传感器节点的状态转换

3.4 拥塞感知路由恢复机制

根据本文的级联机制，过载的传感器节点可以通过重新启动进行自我恢复，但是重新启动后，如果仍然遵循最初

的路由机制,它们将在一段时间后再次过载。因此有必要设计一种路由恢复机制来防止过载的节点不会进入“重启循环”状态。为了恢复故障节点,传统的模型通常选择拥塞值之和最小的链路,这些恢复解决方案只能在节点具有全局拥塞状态信息时有效。然而在无线传感器网络中,传感器节点以分布式方式组织,每个传感器节点不可能实时知道其他节点的拥塞状态。因此本文提出了一种局部拥塞感知的路由恢复机制,即当传感器节点正常工作时,会遵循原来的路由机制,当发生过载时,将遵循路由恢复机制。在这个机制中每个传感器均有一个 $U_i(t)$,表示如下:

$$U_i(t) = [1 - D_{e_{jk}}(t)] \frac{1}{d_i(t)} \quad (11)$$

式中: $d_i(t)$ 表示节点 i 在时间 t 的深度,当传感器节点需要转发中继数据包时,它将从相邻节点中选择最大的 $U_i(t)$ 节点作为下一个跃点。

4 实验结果与分析

4.1 抗毁性指标

本节定义的两个指标分别为网络效率 $U_g(t)$ 和正常节点比例 $H_n(t)$ 。在现有的模型中,网络效率 U_g 定义为 $U_g = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}}$,其中 d_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的最短路径。但是该定义不能正确反映出无线传感器网络的汇聚特性。由于在传感器网络中用户更加关注普通传感器节点传递消息的效率,通常在传感器网络中,用户更加关注从公用传感器节点到接收器的消息传递效率。因此,网络效率 $U_g(t)$ 是从任何传感器节点到宿节点的最短路径的效率的平均值,如式(12)所示。

$$U_g(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{i \in V} \frac{1}{d_i(t)} \quad (12)$$

式中: $d_i(t)$ 表示时间 t 内节点 i 到宿节点的最短路径数量。与大多数现有模型不同的是,本文所建立的方法将与宿节点保持有效连接的节点视为正常节点,正常节点的比例 $H_n(t)$ 如式(13)所示。

$$H_n(t) = \frac{N_n(t)}{N} \quad (13)$$

式中: $N_n(t)$ 表示时间 t 内的正常节点数量。在这里用 $U_g(\infty)$ 和 $H_n(\infty)$ 表示当网络发生级联故障后达到稳态时的网络效率和正常节点比例。

4.2 模拟设置

在大多数级联模型中,级联故障在传感器节点受到前 $q\%$ 的初始攻击时会被触发,然而与由硬件故障引起的节点故障相比,链路故障更可能是由于较少的无线传输引起的。

本文利用 MATLAB 8.0 进行了仿真模拟,建立的网络拓扑结构模型中有 300 个传感器节点,分布在 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 的区域。宿节点位于区域中心,无线传输半径设置为 30 m,初始攻击设置为前 10%的链路,为了确保级联故障是由故意攻击触发的,攻击之前假设初始网络中的每个

节点都是正常的。

4.3 抗毁性指标分析

为了便于描述,分别使用 GNE 和 GPNN 表示常规网络效率和常规正常节点比例,使用 NE 和 PNN 表示本文提出的网络效率和正常节点比例。图 7 所示为 4 种网络拓扑情形。情形 1 表示初始拓扑结构没有节点故障,其他 3 种情形中存在一定数量的节点故障,4 种情形的详细信息如表 2 所示。

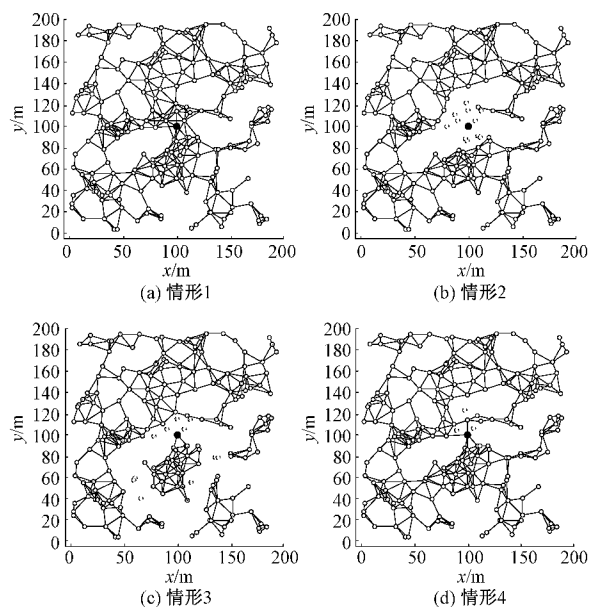


图 7 4 种网络拓扑结构

表 2 4 种情形的详细参数

| 情形 | 移除节点 | 移除链路 |
|----|------|------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 11 | 71 |
| 3 | 11 | 79 |
| 4 | 3 | 23 |

从图 7(a)中可以看出,由于没有节点故障第 1 种情形的网络连接是最优的。在图 7(b)中,由于宿节点周围的节点发生故障,各个节点与宿节点之间的所有路径都被中断,导致传感器节点无法再将数据传递到宿节点,那么可以合理地假设网络完全瘫痪了。在图 7(c)中,仍然有少量节点可以保持与宿节点的有效连接。在图 7(d)中,尽管到宿节点的网络连接不受影响,但由于部分节点故障导致路由的传输成本和传输时间增加。(虚线圆节点是从网络中移除的节点)。

4.4 关键参数的影响

1) 链路公差系数 λ_i 的影响

图 8 表示链路公差系数 λ_i 变化下正常节点 $H_n(t)$ 的比例。从图中可以看出随着 λ_i 的增大, $H_n(t)$ 显著增加,当 $\lambda_i = 0.5$ 时,网络在 $t = 5$ 时达到稳态,且只有 22% 的传

传感器节点能够存活。当 λ_i 增加到 2 时,网络在 $t=1$ 时达到稳定状态,83%的传感器节点能够存活。显然 λ_i 越高,传感器节点传输数据包的容量越大,流量负载不会堆积在缓存中,过载风险就可以得到显著缓解。

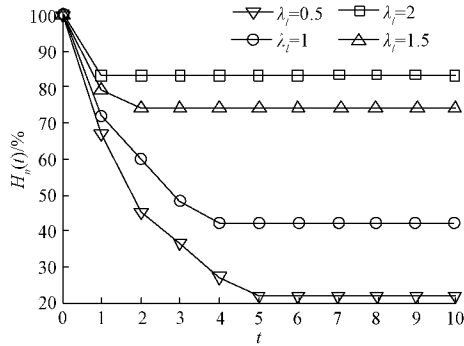


图 8 λ_i 变化下正常节点的比例($\lambda_n=0.5, \Delta t=\infty$)

图 9 表示当级联过程达到稳态时异常节点的组成。从图中可以看出随着 λ_i 的增大,过载节点的比例将显著下降。当 $\lambda_i=0.5$ 时,可以看到 62% 的节点因“被隔离”而不能正常工作。相比之下只有 16% 节点过载时处于故障状态。当 $\lambda_i=2$ 时,被隔离是导致节点故障的唯一原因。此时链路容量只有足够强大应对蓄意攻击造成的流量变化时,级联过程才不会被触发。这也解释了为什么当 $\lambda_i=2$ 的网络在 $t=1$ 时能够达到稳态,即可以得出 λ_i 有一个可使网络不受级联故障影响的阈值。

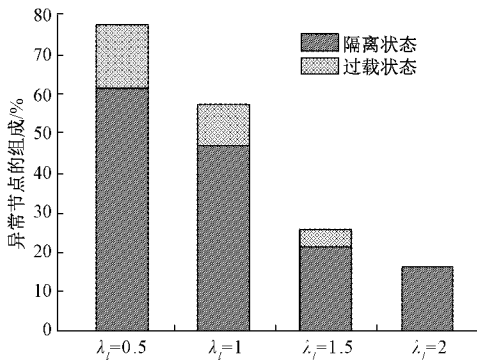


图 9 λ_i 变化下异常节点的组成($\lambda_n=0.5, \Delta t=\infty$)

如图 10 所示,随着 λ_i 的增大,网络效率 $U_g(t)$ 将显著提高。当 $\lambda_i=0.5$ 时, $U_g(t)$ 将会稳定在 0.012 左右,这意味着信息传递严重延迟。当 λ_i 增大到 2 时, $U_g(t)$ 将稳定在 0.123 左右。此时大多数路由都可以生存,网络效率仍然可以得到保证,这是因为 λ_i 越高,生存节点越多,更多的路由被保留而不是被切断了。

2) 节点公差系数 λ_n 的影响

图 11 表示节点公差系数 λ_n 变化下正常节点 $H_n(t)$ 的比例。从图中可以看出 λ_n 的增大不能降低由级联故障引起的损害程度,但它可以推迟级联过程发生。当 $\lambda_n=0.5$ 时,将在下一步攻击之后触发级联过程;当 λ_n 增大到 2 时,

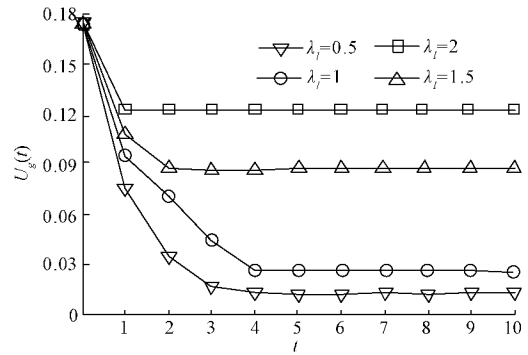


图 10 λ_i 变化下的网络效率($\lambda_n=0.5, \Delta t=\infty$)

级联过程将从 $t=4$ 开始; λ_n 越大,缓存资源的改善越明显,但当输出流量超过带宽容量时,不能缓解数据包的堆积,当数据包发生堆积时,节点将在某些一时刻产生过载。

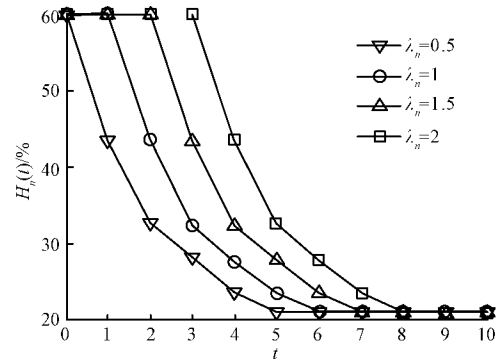


图 11 λ_n 变化下正常节点的比例($\lambda_n=0.5, \Delta t=\infty$)

如图 12 所示, λ_n 的增加只会推迟级联过程中,不能改善级联网络故障的抗毁性。由于 λ_n 的增加无法将更多传感器节点从故障状态中解救出来,消息传递路径不会加强,因此网络效率将保持不变。

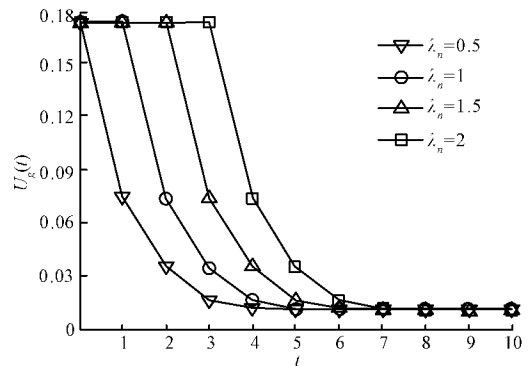


图 12 λ_n 变化下的网络效率($\lambda_n=0.5, \Delta t=\infty$)

本文模型中 λ_n 主要表示传感器节点具有缓存资源。因此当传感器节点不能从超负荷 ($\Delta t=\infty$) 中恢复时,提供更多的缓存资源也无法对级联故障产生有益作用。

3) λ_n 和 λ_i 之间的关系

如图 13 所示,随着 λ_i 的增加,网络传输从低 $H_n(\infty)$

阶段)过渡到高 $H_n(\infty)$ 阶段,相变的阈值 λ_i^* 大约为 1.7。因此为了设计抗毁性优异的级联网络, λ_i 应尽可能设置接近于阈值 λ_i^* 。当 λ_i^* 的值过大时将导致带宽资源的浪费,而当 λ_i^* 的值过小时级联网络的抗毁性较差。此外当 $\Delta t = \infty$ 时,网络的抗毁性不随 λ_n 的增加而有所改善。

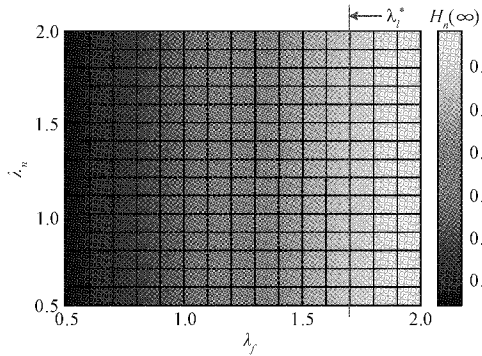


图 13 $[\lambda_n, \lambda_i]$ 参数空间内的 $H_n(\infty)$ 波动图

如图 14 所示,随着 λ_i 的增大,网络传输从低 $U_g(\infty)$ 阶段到高 $U_g(\infty)$ 阶段,相变的阈值 λ_i^* 仍为 1.7。

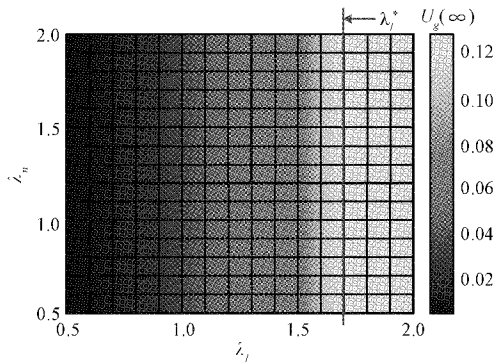


图 14 $[\lambda_n, \lambda_i]$ 参数空间内的 $U_g(\infty)$ 波动图

4) 恢复时间 Δt 的影响

图 15 表示恢复时间 Δt 对正常节点比例的影响。从图中可以看出,随着时间 Δt 的增加, $H_n(t)$ 的推移波动加大。当 $\Delta t = 1$ 时,传感器节点可以在下一时间从故障中恢复,因此 $H_n(t)$ 波动较为平缓,当 $\Delta t = 3$ 时, $H_n(t)$ 波动程度高于 35%,当 $\Delta t = \infty$ 时,传感器节点失去恢复能力, $H_n(t)$ 将为一个稳态值。

如图 16 所示,类似于 Δt 对 $H_n(t)$ 的影响,随着 Δt 的增加, $U_g(t)$ 的波动水平加大,当 $\Delta t = 1$ 时, $U_g(t)$ 约为 0.06,当 Δt 增加到 3 时, $U_g(t)$ 在 $[0.021, 0.065]$ 之间,当 $\Delta t = \infty$ 时, $U_g(t)$ 单调递减稳定在 0.012 左右。

5) λ_n 和 Δt 之间的关系

当 $\Delta t = \infty$ 时(即节点不能从过载中恢复),节点容忍系数 λ_n 只能延迟级联过程发生,不能减少级联故障造成的损失。但是如果允许过载节点在一定的时间内发生延迟, λ_n 的影响也会发生变化。

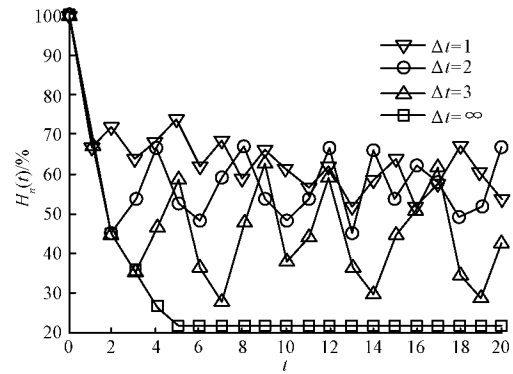


图 15 Δt 变化下正常节点的比例($\lambda_n = \lambda_i = 0.5$)

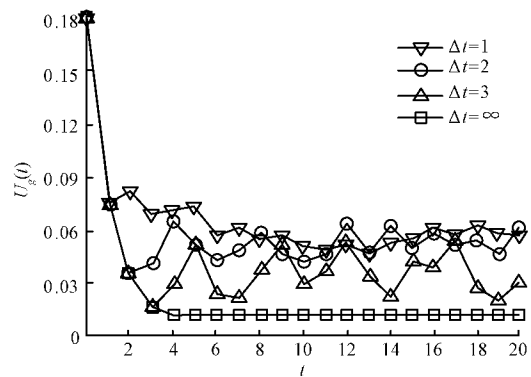


图 16 Δt 变化下的网络效率($\lambda_n = \lambda_i = 0.5$)

如图 17 所示,当传感器节点可恢复时, λ_n 的增加可以减少级联故障造成的损失,降低 $H_n(t)$ 的波动水平。例如,在 $\Delta t = 2$ 时, $\lambda_n = 0.5$ 时, $H_n(t)$ 的范围为 $[45\%, 68\%]$,当 λ_n 增加到 1 时, $H_n(t)$ 的波动范围缩小到 $[54\%, 67\%]$,如果 λ_n 继续增加到 2,可以发现 $H_n(t)$ 趋于稳定值 67%,则可以得出 λ_n^* 存在一个阈值。根据级联机制,对于一个传感器节点,如果输入数据流量和自身数据流量大于链路容量,则不是所有的数据包都能被处理,并且部分数据将堆积在缓存中,经过多次循环后节点将变为过载状态。并且一个传感器节点从正常状态切换到过载状态需要一个持续时间 Δt_s 。为了便于描述,本文定义了故障节点和受影响节点。故障节点指由于过载原因导致的节点失效,受影响节点指受其他故障节点影响的节点。则如果 $\Delta t_s \geq \Delta t$,当失效节点恢复时,受影响节点仍未过载,且级联故障不会进一步扩散;如果 $\Delta t_s < \Delta t$,受影响的节点将在故障节点恢复之前过载,级联进程将继续下去,并将出现新一轮的级联故障。

如图 18 所示,随着 λ_n 的增大, $H_n(t)$ 的波动水平趋于减小,当 λ_n 达到某一阈值 λ_n^* 时, $H_n(t)$ 达到稳定状态。此外, λ_n^* 随延迟时间 Δt 的增加而增加,因此为了防止级联故障扩散, Δt_s 需要变的更长, λ_n^* 需要更大。

4.5 对比实验分析

为了验证本文所提模型的有效性,选择了基于介数的

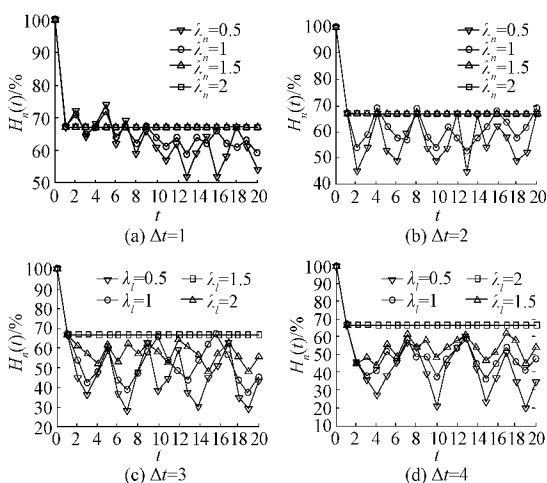


图 17 Δt 和 λ_n 变化下正常节点比例

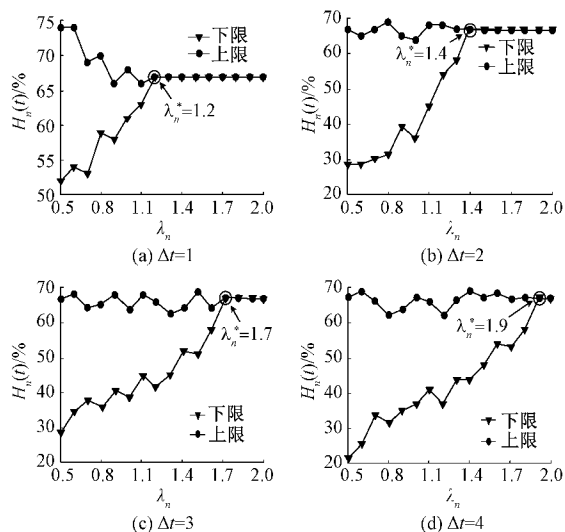


图 18 Δt 和 λ_n 变化下 $H_n(t)$ 的波动水平

模型和基于度的模型与本文所构建的模型进行了性能对比。模型中设置 $\lambda_n = \lambda_i = 0.5, \Delta t = \infty$ ，由于这些模型使用不同的流量度量，触发条件也应该不同，为保证统一性，3 种模型均按照前 5% 的节点攻击进行考虑。

如图 19 所示，在基于度的模型中级联故障造成的后果最严重，在 $t=5$ 时 89% 的传感器节点进入故障状态。这是因为在基于度的模型中，流量负载使得级联故障更容易通过相邻节点进行传播。同时可以看出本文所构建的模型比基于介数的模型引发的故障更严重，基于介数的模型中有 78% 的节点可以存活，而本文所构建的模型中有 71% 的节点能够存活，仅略微少于基于介数的模型。另外，本文所构建的模型中，交通流量表示从任何传感器节点到宿节点的最短路径数，从而使数据流更多地集中在宿节点附近的关键节点上，当这些关键节点受到攻击时流量负载会发生变化，然后进一步导致更大规模的级联故障。

图 20 表示当 $t=10$ 时故障节点的组成。此时，3 种模

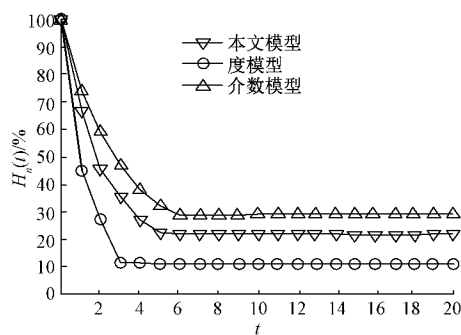


图 19 3 种模型的正常节点比例

型的网络级联过程均能达到稳态。本文所构建的模型中节点的隔离主要由节点故障引起，在另外两个模型中，过载节点和隔离节点的故障相似。这是由于本文所构建的模型中，由于流量负载具有汇聚特性，重新分配的负载将更专注于宿节点附近的节点，一小部分过载节点会严重影响网络的连通性并会引起大量的传感器故障，从而形成隔离节点。

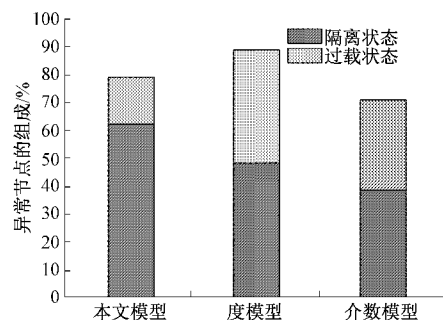


图 20 $t=10$ 时故障节点的组成

4.6 路由恢复机制的性能

对于评估路由的恢复机制性能，本节设计了两种情况：1) $\lambda_i = \lambda_n = 0.5, \Delta t = 2$; 2) $\lambda_i = \lambda_n = 0.5, \Delta t = \infty$ 。如图 21 所示，情形 1 中没有恢复机制，正常节点比例 $H_n(t)$ 将在一段时间内减少到 45%，然后在 [45%，68%] 之间波动。当引入恢复机制后， $H_n(t)$ 明显下降，并在一段时间内恢复达到 100%。情形 2 中通过引入恢复机制， $H_n(t)$ 在 $t=5$ 时即恢复到 100%。同时从图 22 中可以看出，本文所提出的路由恢复性能在网络效率方面具有同样的优异性能。

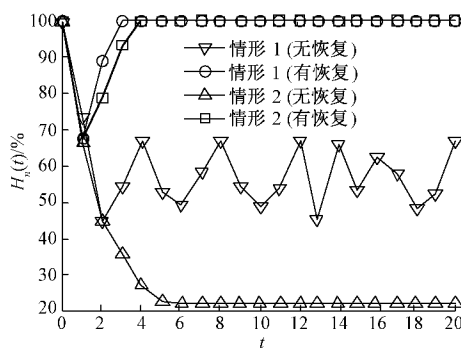


图 21 有/无恢复机制的正常节点比例

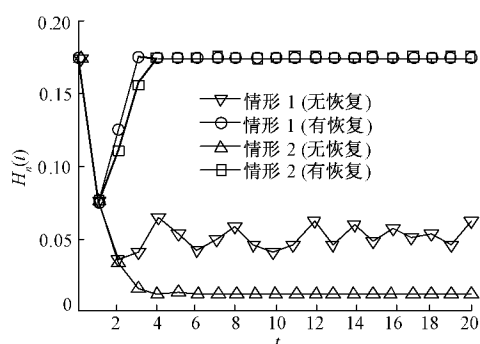


图 22 有/无恢复机制的网络效率

5 结 论

针对当前无线传感器网络的级联模型忽略了链路容量影响而导致流量指标无法正确地反映网络汇聚特征的问题,本文建立了一种受节点容量和链路容量限制的无线传感器网络级联模型。通过实验得到:

1) 提出了一种新的流量度量方向介数,以及考虑拥塞状态、过载状态和隔离状态的级联模型,能够正确反映无线传感器网络的汇聚收敛功能;

2) 所提受节点容量和链路容量限制的无线传感器网络级联模型在传感器节点不可恢复的情况($\Delta t = \infty$),节点容差系数 λ_t 的增加只能推迟级联过程,而不能减少级联故障所造成的损害;

3) 本文中研究中,针对路由协议尚未综合考虑传感器节点的拥塞程度和其他路由的选择因素,因此下一步研究中,可开发一个新的路由协议,用以抵抗级联失效。

参考文献

- [1] 赵亮,兰智高,熊志利. 基于 LEACH 的无线传感器网络簇首选取改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 86-93.
- [2] 王涵,杜文才,万倩倩. 移动无线传感器协作网络的中断概率性能研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(2): 293-298.
- [3] VACCARIO G, WIDER N, MARIANI M S. Quantifying and suppressing ranking bias in a large citation network[J]. Journal of Informetrics, 2017, 21(3): 766-782.
- [4] ZHAI L, YAN X B, ZHANG G J. Bi-directional

h-index: A new measure of node centrality in weighted and directed networks [J]. Journal of Informetrics, 2018, 9(1): 299-314.

- [5] 何敏,官铮,保利勇,等. 无线传感器网轮询接入控制平均查询周期分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2637-2644.
- [6] 符修文,杨勇生. 一种工业无线传感器网络抗毁性仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2019, 12(7): 1342-1350.
- [7] 张阳. 基于相长干涉的无线传感器网络数据收集[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 135-141.
- [8] 符修文,李文锋,段莹. 分簇无线传感器网络级联失效抗毁性研究[J]. 计算机研究与发展, 2016, 21(12): 2882-2892.
- [9] OSTROWSKI B, PIORO M, TOMASZEWSKI A. Resilience through multicast-An optimization model for multi-hop wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2020, 14(107): 138-145.
- [10] 杨祥. 无线传感器网络无标度容错拓扑的连锁故障诊断算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 17(2): 549-551.
- [11] HAUWEELE D, QUOTIN B. Toward accurate clock drift modeling in wireless sensor networks simulation [J]. Computer Communications, 2020, 9(163): 1-11.
- [12] 韩丽,刘彬,李雅倩. 能量异构的无线传感器网络加权无标度拓扑研究[J]. 物理学报, 2014(15): 42-49.
- [13] 钱钢,王黎明,毕帅帅,等. 水下无线传感器网络路由协议节能算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 29-33.
- [14] 陈辉,张春雨. 一种基于卡尔曼滤波的分簇 WSNs 拥塞检测与控制方案[J]. 传感技术学报, 2020, 33(4): 579-585.
- [15] 邓玉静,王倩悦,尹荣荣,等. 考虑级联失效的有向 WSN 节点重要度评估模型[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(1): 111-116.

作者简介

贾立伟, 讲师, 主要研究方向为人工智能和信息安全。

E-mail: 2496574084@qq.com

董西广, 副教授, 主要研究方向为计算机网络体系结构。

E-mail: dong_1981@163.com

魏里, 讲师, 主要研究方向为分布式人工智能。

E-mail: weili@sina.com