doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2015216

基于局域信息和能量因素的 WSN 关键点判定算法

刘彬[1,2]，孙雅静[1]，刘浩然[2]，尹荣荣[2]

(1. 燕山大学 电气工程学院，河北 秦皇岛 066004；
2. 燕山大学 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室，河北 秦皇岛 066004)

摘 要：针对无线传感器网络现有关键点判定方法中，判定指标比较单一，容易导致关键点判定结果不全面的问题，综合考虑节点局域信息和能量因素，提出一种新的关键点判定算法。此算法首先利用节点自身度与其邻居信息对节点局域信息进行建模，接下来结合节点剩余能量和节点失效后网络能耗的变化，建立能量因素模型，最终得到一个综合的关键点判定模型。利用 Matlab 仿真平台与其他算法进行对比仿真，结果表明该算法能使关键点判定更加全面，同时验证在保护由此算法判定所得关键点时，网络能够表现出强抗毁性，验证此算法的有效性。

关键词：无线传感器网络；关键点判定算法；局域信息；能量因素

中图分类号：TP393 **文献标识码**：A

Key node decision algorithm based on local information and energy factor in wireless sensor network

LIU Bin[1,2], SUN Ya-jing[1], LIU Hao-ran[2], YIN Rong-rong[2]

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinghuangdao 066004, China;
2. Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinghuangdao 066004 China)

Abstract: In the existing key node decision methods for wireless sensor network, the judgment index was so single that the result judged was deficient. In order to solve this problem, a new key node decision algorithm (KNDA) based on local information and energy factor was proposed. Firstly, the local information model based on the degree and neighbor information of node was established. Secondly, according to the residual energy of node and the change of network energy consumption after the node failed, the models of energy factors were established. Finally, an aggregative key node decision model was formed. Extensive simulation experiments were carried out in the MATLAB simulation platform, by comparing with other algorithms, the results verify that the key nodes obtained by this algorithm are more sufficient. Meanwhile when the key nodes judged by KNDA are protected, the network can show strong invulnerability.

Key words: wireless sensor network; key node decision algorithm; local information; energy factor

1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)中节点能量受限，部署环境恶劣，同时网络结构的不均衡，会导致节点因能量耗尽而失效[1]。为了降低节点失效的概率，判定出在网络中起到重要作用且容易失效的关键点，并对此类节点进行维护，能够有效增强网络抗毁性。因此，研究 WSN 中节点的重要性具有重要意义。

目前，关键点判定方法针对无能量限制的复杂网络提出的居多，常用的复杂网络中心性指标有度指标、介数指标、流介数指标、紧密度指标等[2,3]。为了平衡度指标的弱关联性与介数等指标的高复杂度，文献[4]提出了一种半局域中心性衡量指标，并利用节点信息的传播速度和接收到信息的节点数量来判定关键节点。文献[5]为了补充传统指标判定不到的关键点，提出了一种利用各节点对之间信息通信的概率与 k 中心聚类算法相结合的新方法，

收稿日期：2014-10-31；**修回日期**：2015-03-11
基金项目：河北省自然科学基金资助项目（F2014203239, F2015203091）
Foundation Item: The Natural Science Foundation of Hebei Province (F2014203239, F2015203091)

进行节点重要性评估。Gao 等在文献[6]中利用仿生方法论提出了一种新的节点中心性评估模型，结合 K-shell 方法确定网络中的重要节点。其他一些近期的文献也分别从网络凝聚度、网页等级矢量等新的角度对重要节点评估方法进行了研究，Wang 等在文献[7]中定义节点的重要度为节点自身重要度值与连接此节点所有边的重要度值的加权和，提出了一种利用节点收缩后凝聚块的大小来判断关键点的方法。文献[8]将网页等级矢量的概念引入到网络中，通过建立网络中不同节点的等级序列来评估节点重要性。文献[9]考虑到局部聚类对信息通信的影响，提出了一种利用聚类等级矢量进行节点重要性排序的方法。文献[10]提出了一种基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法。文献[11]用与理想解决方案类似的性能排序手段 TOPSIS 来评估节点的重要程度。文献[12]结合了随机行走的介数中心性方法和利用网页等级矢量算法建立节点等级序列的思想，提出了一种新的中心性指标。文献[13]考虑节点邻居之间连接的紧密程度，提出了一种基于节点度与集聚系数的节点重要性评价方法。文献[14]通过建立级联失效模型，给出了一种根据失效节点负载分配来判定关键点的思路。文献[15]提出一种基于节点接近度和节点在其邻域中关键度评估网络中节点重要度的方法，即通过考虑节点全局特性和局部特性定义网络中节点重要性。文献[16]将合作博弈论中著名的沙普利值概念应用于求解网络中的 k 个最重要节点问题中，并结合节点度判定网络关键点。但是上述方法对于能量因素考虑较少，也就难以判定出 WSN 中能量消耗较快的关键点，针对该问题，文献[17]研究了节点在拓扑中的贡献程度，提出了一种计算节点重要性和网络抗毁性的方法。文献[18]定义一系列门限函数，考虑节点能量，根据网络不同运行周期来选择不同门限值，达到门限值以下的节点定义为关键节点。在文献[19]中，Liu 等提出了一种基于能量因素指标的 WSN 关键节点判定算法，该算法通过计算节点剩余生命期来评估节点重要性。但是上述方法多数只研究了某一种因素对节点关键程度的影响，对于网络中局域信息和能量因素的综合研究较少，使判定结果缺乏全面性，导致在后期网络维护时达不到预期效果。

针对上述问题本文考虑 WSN 节点局域信息和能量因素综合指标，给出关键点判定模型，定义节点重要度不仅和自身节点度有关，还需结合邻居信息与能量因素，将节点剩余能量和节点失效删除后导致网络增加的能耗值综合考虑。在判定模型基础上提出一种关键点判定算法(KNDA, key node decision algorithm)，通过与其他算法进行对比仿真可知，保护由此算法判定所得关键点能够使网络在应对节点随机失效或能量耗尽失效时，均具有强抗毁性，验证该算法的有效性。

2 网络拓扑结构与判定因素的研究

在 WSN 拓扑中，节点发射半径区域内的节点会对节点的重要度产生影响，也就是节点重要性受影响于自身及其邻居节点，并且由于节点能量有限，节点的重要性也与节点能量和网络能量因素有关。因此在决定关键点的判定因素时，要综合上述方面考虑。

2.1 网络拓扑结构

网络中的节点分为 sink 节点和普通节点 2 种，sink 节点能量不受限制。本文对网络拓扑按照到 sink 节点的跳数进行分层。分层结构如图 1 所示，其中，第 n 层节点是第 $n-1$ 层节点的父节点层，第 $n-1$ 层节点是第 n 层节点的子节点层(如第 1 层中的节点 1 和节点 2 是第 2 层中的节点 6 的子节点；相应的节点 6 是节点 1 和节点 2 的父节点)。

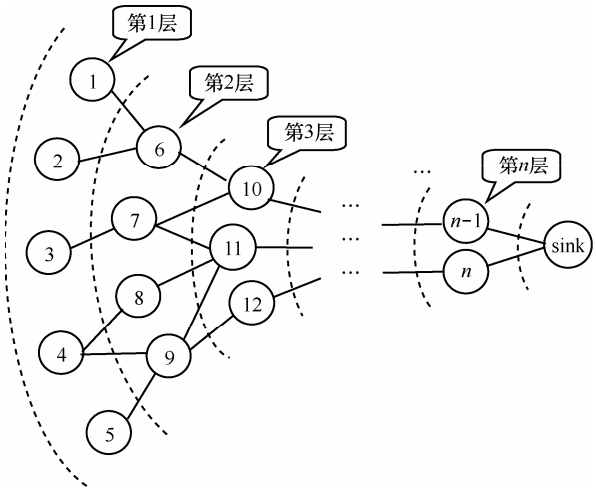

图 1 网络拓扑结构

2.2 节点的局域信息模型

在判定网络的关键点时，节点的局域信息起着至关重要的作用。单一考虑节点自身度无法反映节点的邻居情况，邻居节点也对节点重要性有显著影响，而节点度和邻居节点度又只能获取节点的部分

邻居信息，不能反映邻居之间的紧密程度。因此将节点度、邻居节点度和节点的集聚系数综合考虑，建立三者之间的联系，得到节点的局域信息模型，即局域参数 μ。

假设网络 $G=(V,E)$ 是由 $|V|=N$ 个节点和 $|E|=M$ 条边组成的一个无向网络。节点 i 的度即节点 i 的邻居个数，即 k_i

$$k_i=\sum_{x\in V}a_{ix} \tag{1}$$

其中，$a_{ix}=\begin{cases}1, & i,x\text{之间有连接}\\ 0, & i,x\text{之间没有连接}\end{cases}$。

节点度体现的是节点与周围节点之间建立直接联系的能力，无法反映节点的邻居情况，难以准确表现出节点在网络中的重要程度，而邻居节点也会对关键点的判定产生重要影响，因此还需考虑邻居节点度。给出综合节点度和邻居节点度的表达式 φ_i。

$$\varphi_i=k_i+\sum_{x\in\Omega_i}k_x \tag{2}$$

其中，k_x 代表节点 x 的度，Ω_i 表示节点 i 的邻居节点集合。

式(2)中的邻居节点度能体现邻居节点的边数，而不能反映其邻居节点的连边情况，为了充分获取节点的邻居信息，这里引入节点的集聚系数[9]。

节点 i 的集聚系数描述节点 i 的邻居之间互为邻居的比例，即 C_i

$$C_i=\frac{E_i}{R_i} \tag{3}$$

其中，E_i 表示度为 k_i 的节点 i 邻居节点之间实际连边数；R_i 代表节点 i 的邻居节点之间可能形成的最大连边数，有 $R_i=\frac{k_i(k_i-1)}{2}$，因此可知 $C_i\in[0,1]$。

节点的集聚系数体现了节点邻居之间的紧密程度，而无法反映邻居节点的规模，因此将 C_i 与能够反映邻居节点规模的 φ_i 结合起来，得到综合度指标与集聚系数的局域参数 μ

$$\mu=-\frac{C_i}{\varphi_i} \tag{4}$$

式(4)即为所要建立的局域信息模型，在式(4)中，集聚系数 C_i 越小，邻居节点紧密度越小，同时 φ_i 越大，则 μ 越大，节点 i 也就越重要。局域参数 μ 利用节点度与其集聚系数，充分体现了节点的局域信息。

在最终得到的局域信息模型中，μ 的大小反映了节点 i 从结构方面对网络的重要程度，已有的关键点判定方法或单一依赖于节点自身度，或需要掌握网络全局信息。本文在判定关键点时，利用上述得到的局域参数 μ，考虑节点自身及其邻居信息，不仅可以探测出自身度大的节点作为关键点，同时还可以将自身度很小，但在网络中起着重要作用的桥节点也作为关键点探测出来，并且只要求获得局部信息即可，对已有的一些关键点判定方法做出了改进，同时在后期维护这些关键点时，能够达到增强网络抗毁性的目的。

2.3　能量因素模型

WSN 中节点能量有限，能量耗尽导致的节点失效占失效节点总数的一部分比例。若将判断能量耗尽较快节点的方法融入到节点的重要性评估中，并对判定所得关键点加以保护时，就能够减少因能量耗尽而失效的节点，均衡网络能耗，增强网络抗毁性。接下来将建立能量因素模型，即能量参数 τ、υ。

本文将网络中的节点能量参数 τ 定义为与节点剩余能量相关的量，即

$$\tau=1-\frac{E_{\mathrm{re}}(i)}{E(i)} \tag{5}$$

其中，$E_{\mathrm{re}}(i)$ 代表节点 i 的剩余能量，$E(i)$ 表示节点 i 的初始能量。

式(5)即为节点能量参数模型，参数 τ 的大小反映了节点 i 从考虑节点能量方面对网络的重要程度，即节点剩余能量越小，τ 值越大。

接下来，给出网络能量参数 υ 的建模过程，本文采用通用的无线通信能耗模型[15]来计算节点的能耗。

节点发送 k bit 数据所需要的能量为

$$E(k,d)=E_{\mathrm{elec}}k+\varepsilon_{\mathrm{amp}}kd^2 \tag{6}$$

节点接收 k bit 数据所消耗的能量为

$$E(k)=E_{\mathrm{elec}}k \tag{7}$$

其中，E_{elec} 为射频传输系数，$\varepsilon_{\mathrm{amp}}$ 为发送装置的放大系数，d 为节点间的距离。

因此，网络中的节点在每一轮所消耗的能量为

$$E_{\cos}=2E_{\mathrm{elec}}k+\varepsilon_{\mathrm{amp}}kd^2 \tag{8}$$

节点通过单跳进行数据传输，当节点 i 由于某种原因在 t 时刻失效删除后，原来要经过节点 i 向 sink 节点传输数据的子节点就要寻找其他最短路径（距离 sink 节点的跳数最小）来进行数据传输，而此时选择新路径（t+1 时刻）与选择旧路径（t 时刻）的能耗将存在一个差值，这个差值就是节点能耗增加值。

当某一节点失效后，其子节点可能需要通过同层节点进行数据传输，本文将节点的转发概率定义为

$$P(i)=\frac{E_{\mathrm{re}}(i)}{E(i)k_i} \tag{9}$$

由式(9)可以看出，$0\leqslant P(i)\leqslant 1$，$E(i)$给定，节点的剩余能量越大，度越小，其成为转发节点的概率越大。如果节点 k 选择同层节点转发数据，且同层节点个数为 j，则节点 k 选择其中一个同层节点 i 进行数据转发的概率为

$$P_{k\to i}=\frac{P(i)}{\sum_{l=1}^{j}P\left(l(id)\right)} \tag{10}$$

式(10)为节点进行同层数据传输时，选择下一跳节点的归一化概率，其中 $l(id)$ 为 k 的 j 个同层节点的 ID 号。

由于节点通过单跳进行数据传输，接收子节点的数据为以当前节点为父节点的所有节点数据累加和，但是节点的能量消耗外在表现为接收一跳子节点数据和发送到父节点数据所消耗的能量，因此在计算由于节点失效删除导致网络能耗增加值时，只考虑节点的一跳子节点能耗增加值。

在 t 时刻节点 i 失效，节点 i 的子节点在 t 时刻所消耗的能量为 E_t

$$E_t=\sum_{q=1}^{Q}P_{tq}E_{\cos} \tag{11}$$

其中，Q 表示节点 i 的子节点 q 在下一跳选择时进行同层数据传输的节点个数；P_{tq} 表示在 t 时刻节点 i 的子节点 q 把数据通过同层节点进行传输的归一化概率。

节点 i 的子节点在 t+1 时刻所消耗的能量为 E_{t+1}

$$E_{t+1}=\sum_{q=1}^{Q}P_{(t+1)q}E_{\cos} \tag{12}$$

其中，$P_{(t+1)q}$ 表示节点在 t+1 时刻节点 i 的子节点 q 把数据通过同层节点进行传输的归一化概率。

由式(11)和式(12)可以得到节点 i 失效删除后导致的网络能耗增加值，并将此作为网络能量参数 υ，即

$$\upsilon=E_{t+1}-E_t=\sum_{q=1}^{Q}P_{(t+1)q}E_{\cos}-\sum_{q=1}^{Q}P_{tq}E_{\cos} \tag{13}$$

式(13)即为所要建立的网络能量参数模型，其中 υ 的大小反映了节点 i 从考虑网络能耗方面对网络的重要程度。本文在判定网络中的关键点时，综合考虑了节点能量参数 τ 和网络能量参数 υ，不仅可以探测出剩余能量较小的节点作为关键点，同时还能够将失效删除后使网络能耗值增加较大的节点探测出来，在后期维护这些关键点时，能够增强网络的抗毁性。

节点的局域参数 μ 与能量参数 τ、υ 模型的建立，决定了网络中关键点的判定因素为其局域信息与能量因素的综合指标，为下面构建关键点判定模型，实现全面判定关键点，并分析保护判定所得关键点后的网络抗毁性奠定了基础。

3 关键点判定算法研究

综合第 2 节给出的节点局域信息模型(局域参数 μ)和能量因素模型(包括节点能量参数 τ 和网络能量参数 υ)，给出关键点判定模型，来评价网络中节点的重要程度，并给出算法实现的基本流程。

3.1 算法描述

在评估节点的重要性时，如果缺少了对节点局域信息、节点剩余能量和网络能耗中某一方面的考虑，则有可能产生遗漏关键点的情况，使判定结果缺乏全面性。因此，将这三者结合起来既可以体现节点自身重要性及其对网络的重要程度，又可以在对关键点进行保护的同时达到增强网络抗毁性的目的。

在 KNDA 中，采用“比例权值(ratio-W)算法”[16]，将局域参数 μ、节点能量参数 τ 和网络能量参数 υ 结合起来，其中 μ 是根据节点自身度及其邻居信息得到的；τ 与节点剩余能量相关；而 υ 是指节点失效并删除后，网络能耗的增加值，综合这 3 个因素，给出关键点判定模型

$$\begin{aligned}V_{\mathrm{imp}}&=\mu^{\alpha}\tau^{\beta}\upsilon^{\gamma}\\&=\left(-\frac{C_i}{\varphi_i}\right)^{\alpha}\left[1-\frac{E_{\mathrm{re}}(i)}{E(i)}\right]^{\beta}\left(\sum_{q=1}^{Q}P_{(t+1)q}E_{\cos}-\sum_{q=1}^{Q}P_{tq}E_{\cos}\right)^{\gamma}\end{aligned} \tag{14}$$

其中，α、β、γ 为正常数且 $\alpha+\beta+\gamma=1$，可分别称为局域因子、节点剩余能量因子和网络能耗增加因子。可以通过动态调整参数因子来满足不同的关键点探测需求，若侧重于判定在网络结构中起重要作用的节点，可以使 α 取值趋近于 1；若侧重于判定剩余能量较小的节点，可以使 β 取值趋近于 1；类似地，若侧重于判定导致网络能耗增加较大的节点，可以使 γ 取值趋近于 1。

在本算法中，由于利用节点自身及其邻居信

息来确定节点局域信息，能够实现判定所得关键点的自身重要性及其在网络中的价值体现；同时还考虑到节点剩余能量和网络能耗等能量因素，能够探测出剩余能量较少、能耗速度过快的关键点，在后期维护这些关键点时，能够使网络表现出更强的抗毁性。

根据式(14)所示的关键点判定模型，给出KNDA算法的基本流程，表1为各节点的表头格式。

表 1　　各节点列表的表头格式

节点 ID
父/子节点 ID
同层邻居节点 ID
节点度 k
节点剩余能量 E_{re}
节点能耗速率 $E_{\cos}$
节点的重要度 V_{imp}

下面给出 WSN 中 KNDA 算法的基本步骤。

步骤 1　sink 节点进行洪泛广播，来确定各节点所在的层(即节点距 sink 节点的跳数)以及各节点的同层邻居节点和父/子节点。各个节点统计自己的父/子节点和同层邻居节点，并把信息放入自己的内存单元中。

步骤 2　通过统计每个节点自身的度及其邻居信息来表征节点的局域信息，得到局域参数 μ。

步骤 3　节点通过自身感知得到节点的剩余能量，再结合赋予节点的初始能量，得到节点能量参数 τ。

步骤 4　在给定实验环境参数的条件下，计算节点的能耗速率 $E_{\cos}$，并且计算节点失效前后节点向同层节点进行数据传输的归一化概率 $P_{k\to i}$，得到网络能耗增加值，也即网络能量参数 υ。

步骤 5　将按照上述步骤得到的局域参数 μ、节点能量参数 τ 和网络能量参数 υ 代入到给出的关键点判定模型式(14)中即可求得节点的重要度 V_{imp}，每个节点将自身计算所得重要度和节点 ID 发回给 sink 节点，sink 节点根据所有节点的重要度值大小对节点进行排序。

3.2　算法复杂度分析

假设网络中有 n 个普通节点，sink 节点位于网络中心，在最坏情况下进行复杂度分析。

根据步骤 1 需要统计每个节点的父/子节点以及同层邻居节点，由 sink 节点开始向 n 个节点进行由内向外的洪泛广播，统计节点所在的层，因为每个节点在构建邻居列表时最多的统计次数为 n 次，所以 n 个节点的计算复杂度为 $O(n^2)$；步骤 2 统计节点自身度及其邻居信息的复杂度为 $O(n)$；步骤 3 统计节点能量的复杂度为 $O(n)$；步骤 4 计算节点的能耗速率 $E_{\cos}$ 由式(8)可以得出，计算复杂度为 $O(n^2)$，计算节点的归一化转发概率 $P_{k\to i}$ 可以由式(10)得出，计算复杂度为 $O(n^2)$，计算节点“移除”前的能耗值 E_t 和“移除”后的能耗值 E_{t+1}，复杂度与计算节点的能耗速率 $E_{\cos}$ 相当，因此可知计算网络能耗增加值 υ 的复杂度为 $O(n^2)$；根据步骤 5 需要计算节点的重要度 V_{imp}，根据式(14)可知 n 个节点总的计算复杂度为 $O(n^2)$。综上所述，本文所提关键点判定算法的复杂度为 $O(n^2)$。

4　仿真分析

本文采用 Matlab 仿真工具对算法性能进行仿真，将本文提出的 KNDA 算法与目前国内外相关研究领域比较经典的 3 种算法：基于沙普利值的重要节点判定算法[16](SPIN, Shapley value-based influential nodes)、基于节点在拓扑中贡献程度的节点重要性评估算法[17](NIEET, node importance evaluate based on energy and topology)和基于节点能量因素指标的关键点判定算法[19](CNDBE, crucial node decision algorithm base on energy)进行仿真对比，其中每一次实验结果均为 50 次实验的平均值。节点均匀分布在 100 m×100 m 的方形区域，sink 节点能量不限且位于区域中心，其他普通节点的初始能量为 1 J，实验环境参数如表 2 所示。

表 2　　实验环境参数

参数	取值
节点个数 N	100
节点分布区域 A	100 m×100 m
节点最大传输半径 R	30 m
节点产生数据分组 L	4 000 bit
数据融合能耗 E_{elec}	50 J/bit
放大器功放能耗 $\varepsilon_{\mathrm{amp}}$	100 J·bit^{-1}(m^2)$^{-1}$
节点初始能量 E	1 J
sink 节点坐标	(50 m,50 m)
数据传输速率	250 kbit/s
局域因子 α	1/3
节点剩余能量因子 β	1/3
网络能耗增加因子 γ	1/3

4.1　节点的重要度分布

在图 2 所示的网状拓扑结构(其中 sink 节点标记为空心圆)上，利用本文所提 KNDA 算法，按照式(14)计算每个节点的重要度值，根据结果绘制出网络中节点的重要度分布图，如图 3 所示。

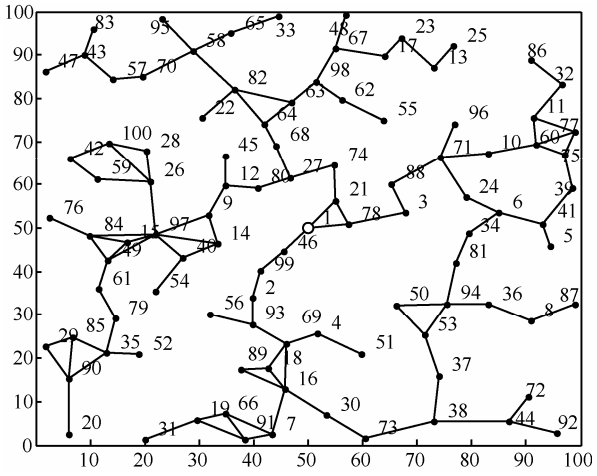

图 2　网状拓扑结构

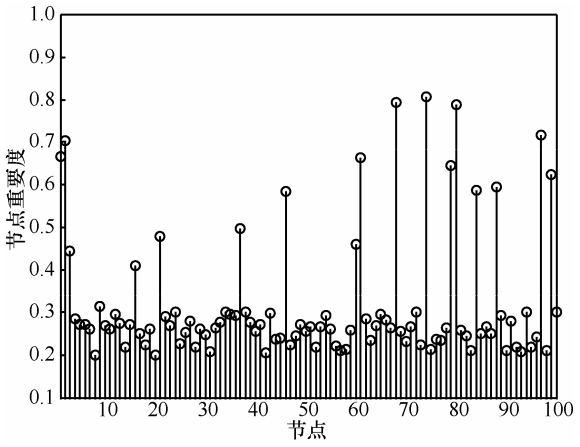

图 3　节点重要度分布

从图 3 可以看出，网络中存在着部分高重要度值的节点，其中不仅包含图 2 中自身度大的节点，也包括一些桥节点，如 68、74 等节点，若在关键点判定模型中，只考虑节点自身的度，这些重要节点很容易被遗漏，同时，图 2 中也存在着一些重要度值较小的周边节点，如 5、22 号节点，它们不满足被判定为关键点的条件，因此不作为关键点。本算法考虑到的局域信息，还可以将邻居紧密度小、导致局域不稳定的节点作为重要节点探测出来。在这些重要节点中还包含着一些剩余能量较小和删除节点后导致网络能耗值增加较大的节点。在关键点判定模型中，判定因素单一可能会导致遗漏某些重要节点，而这些可能遗漏的节点恰好在网络中起着保证网络连通并正常工作的作用。KNDA 算法判定因素考虑全面，减少了遗漏关键点的情况，为保护网络中具有高重要度值的关键点奠定了坚实的基础。

4.2　网络抗毁性对比分析

根据本文所提 KNDA 算法，由式(14)计算得出每个节点的重要度值，根据重要度值的大小判断出网络中最关键的 10 个节点，并结合由 SPIN、NIEET 和 CNDBE 算法判定所得的 10 个最关键节点，分别按照由不同算法得到的关键点重要度值大小进行排序，如表 3 所示。

表 3　节点重要度值位于前 10 的节点编号

排序	SPIN	NIEET	CNDBE	KNDA
1	16	97	97	74
2	97	69	27	68
3	35	94	78	80
4	98	58	12	97
5	60	71	63	2
6	71	26	80	1
7	58	60	68	99
8	100	1	35	46
9	94	27	69	64
10	41	63	64	9

由表 3 可以看出，97 号节点在 SPIN、NIEET 和 CNDBE 算法中的关键程度排名靠前，而在本文所提的 KNDA 算法中，97 号节点的关键程度为第 4。这是由于 SPIN 算法虽然综合了节点度、邻居节点度和沙普利值进行关键点的判定，但未考虑节点能量；NIEET 算法过度依赖于节点度来判定关键点；而 CNDBE 算法虽然考虑了节点能量，但未考虑局域信息，这 3 种算法判定因素均不全面。在综合考虑节点的局域信息和能量因素的算法 KNDA 中，结合图 2 可知，74、68、80 号节点均比 97 号节点重要。再如 99 号节点，SPIN、NIEET 和 CNDBE 算法均未考虑到其失效可能造成的网络能耗增加值，因此没有将 99 号节点作为关键点，但是应用 KNDA 算法能够将其判断为关键点。KNDA 算法不仅考虑了节点局域信息对节点重要程度的影响，同时考虑了节点剩余能量和节点失效网络能耗增加值，因此能够判定出其他算法较易忽略的关键点，验证了 KNDA 算法的有效性，使判定结果更加全面。

分别按照由 SPIN、NIEET、CNDBE 和 KNDA

算法计算出的节点重要度从大到小的顺序选择性移除网络中的节点，每次移除 1 个节点。统计包含 sink 节点的连通块中节点数目，直至网络中包含 sink 节点的连通块中节点数目少于网络节点总数的 $\frac{1}{5}$ 时截止，结果如图 4 所示。

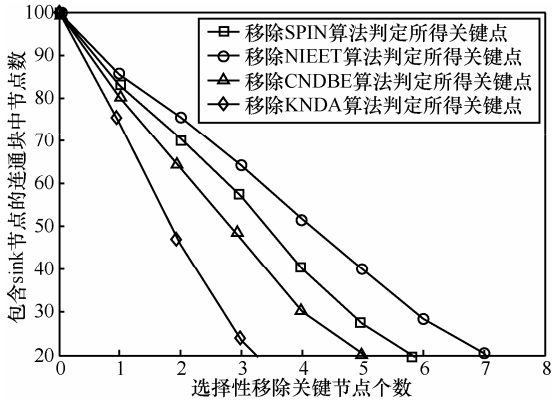

图 4　移除关键点后网络中包含 sink 节点的连通块变化情况

从图 4 中可以看出，移除由 KNDA 算法判定所得关键点时，连通块中的节点个数下降速度最快，并且在选择性移除 4 个最重要的节点时，连通块中的节点数目就少于 20 个了。这是因为在 KNDA 关键点判定算法中综合考虑了网络中节点的局域信息和节点能量、网络能量因素，使判定结果减少了遗漏最关键节点的情况。同时图 4 也可从反面说明保护由 KNDA 算法判定所得关键点的网络，其比保护由 SPIN、NIEET 和 CNDBE 算法判定所得关键点的网络能表现出更强的抗毁性。

接下来，在分别保护由 SPIN、NIEET、CNDBE 和 KNDA 算法判定所得的 10 个最关键节点的情况下，随机移除网络中的节点，每次移除一个节点，统计包含 sink 节点的连通块中节点个数，结果如图 5 所示。

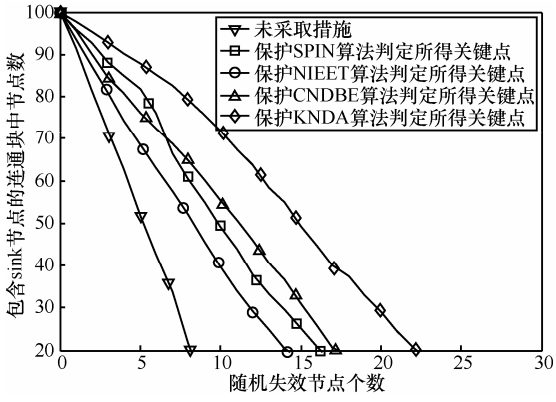

图 5　随机移除节点后网络中包含 sink 节点的连通块变化情况

由图 5 可知，保护由 KNDA 算法判定所得关键点的网络在面对节点随机失效时，比保护由 SPIN、NIEET、CNDBE 算法判定所得关键点的网络和未采取任何措施的网络表现出更强的容忍力，随着节点的失效，连通块中节点数目下降速度最慢，并且在随机移除 20 个节点后，连通块中的节点个数仍有 20 个，而其他 4 种网络却达不到这样的效果。同时，在图 5 中可看出，SPIN 算法由于考虑到节点度及邻居节点度，因此在随机失效节点个数较少时，节点连通性强于 NIEET 和 CNDBE 算法，但当失效节点个数达到 8 个甚至更多时，未考虑能量因素的 SPIN 算法相比于 CNDBE 算法，其包含 sink 节点的连通块中节点个数明显较低。通过整体结果对比，进一步验证了 KNDA 算法判定因素全面，其判定所得关键点在网络中具有重要作用。

最后，在分别保护 SPIN、NIEET、CNDBE 和 KNDA 算法判定所得关键点的情况下，研究在节点因能量耗尽而失效情况下的网络抗毁性，统计随着节点失效包含 sink 节点的连通块中节点个数，结果如图 6 所示。

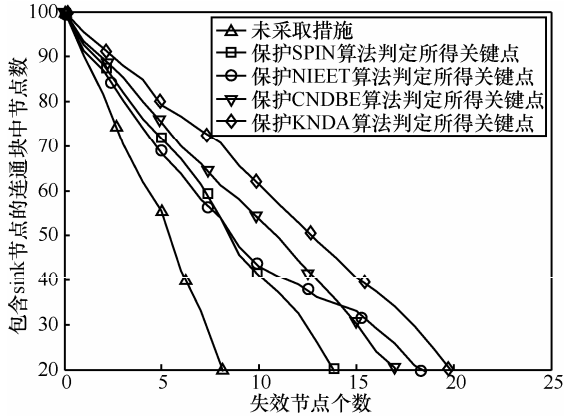

图 6　能量耗尽引起节点失效情况下包含 sink 节点的连通块变化情况

在图 6 中，通过比较可以发现，保护 KNDA 算法判定所得关键点的网络在面对能量耗尽引起的节点失效时，具有更强的容忍能力，当失效节点个数达到 20 个时，保护 KNDA 算法判定所得关键点的网络，连通块中的节点个数仍有 20 个，而另外 4 种网络包含 sink 节点的连通块中，节点个数均少于 20 个。这是由于 KNDA 算法在确定判定因素时，不仅确定了网络中节点的局域信息，还考虑到了节点剩余能量和节点失效删除后网络能耗的增加值，这就使随着网络的运行、节点能量的减少，保护了 KNDA 算法判定所得关键点的网络能够更好地容忍由于能量耗尽

引起的节点失效，增强了网络的抗毁性。

5 结束语

关键点的判定是提高网络抗毁性的重要前提。本文通过综合考虑 WSN 中节点的局域信息和能量因素，提出了一种关键点判定算法——KNDA 算法。仿真对比了 KNDA 算法与其他算法的性能差别，结果表明，保护 KNDA 算法判定所得关键点的网络，在面对节点随机失效和能量耗尽失效时，均表现出了强容忍力，达到了增强网络抗毁性的目的。该算法能有效、准确地判定出其他方法较难捕捉到的关键点，解决了关键点判定结果缺乏全面性的问题。接下来将进一步研究如何更好地保护网络中的关键点。

参考文献：

[1] ALBERT R, JEONG H, BARABASF A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(7):378-382.

[2] SUN C C, RUAN S J, SHIE M C. *et al*. Dynamic contrast enhancement based on histogram specification[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(4):1300-1305.

[3] 刘建国，任卓明，郭强，等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展[J]. 物理学报, 2013, 62(17):178901.
LIU J G, REN Z M, GUO Q, *et al*. Node importance ranking of complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(17):178901.

[4] CHEN D, LV L, SHANG M S, *et al.* Identifying influential nodes in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 391(4): 1777-1787.

[5] ZHANG X, ZHU J, WANG Q, *et al*. Identifying influential nodes in complex networks with community structure[J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 42: 74-84.

[6] GAO C, LAN X, ZHANG X G, *et al*. A bio-inspired methodology of identifying influential nodes in complex networks[J]. PloS One, 2013, 8(6): e66732.

[7] WANG J S, WU X P, YAN B, *et al*. Improved method of node importance evaluation based on node contraction in complex networks[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 1600-1604.

[8] TARAS A, JOSE L O, LEANDRO T, *et al.* An algorithm for ranking the nodes of an urban network based on the concept of PageRank vector[J]. Applied Mathematics & Computation, 2012, 219(4):2186-2193.

[9] CHEN D B, GAO H, LV L, *et al*. Identifying influential nodes in large-scale directed networks: the role of clustering[J]. PloS One, 2013, 8(10): e77455.

[10] 于会，刘尊，李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报, 2013, 62(2):020204.
YU H, LIU Z, LI Y J. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2):020204.

[11] DU Y X,GAO C, HU Y, *et al*. A new method of identifying influential nodes in complex networks based on TOPSIS[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 399(1):57-69.

[12] AGRYZKOV T, OLIVER J, TORTOSA L, *et al*. A new betweenness centrality measure based on an algorithm for ranking the nodes of a network[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 244(1): 467-478.

[13] 任卓明，邵凤，刘建国，等. 基于度与集聚系数的网络节点重要性度量方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12):128901.
REN Z M, SHAO F, LIU J G, *et al*. Node importance measurement based on the degree and clustering coefficient information[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12):128901.

[14] WU J, TAN Y J. Finding the most vital node by node contraction in communication networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems [C]. Changsha, China, 2005. 1283-1286.

[15] 陈静，孙林夫. 复杂网络中节点重要度评估[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3):426-429.
CHEN J, SUN L F. Evaluation of node importance in complex networks[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(3):426-429.

[16] RAMASURI N, YADATI N. A shapley value-based approach to discover influential nodes in social networks[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2010, (99): 1-18.

[17] 齐小刚，张成才，刘立芳. WSN 节点重要性和网络抗毁性的分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(S2): 33-37.
QI X G, ZHANG C C, LIU L F. Study on node importance and network invulnerability analysis of wireless sensor networks[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2011, 31(S2): 33-37.

[18] ZOU S, NIKOLAIDIS I, HARAMS J J. ENCAST: energy-critical node aware spanning tree for sensor networks[A]. Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference[C]. Montreal, Canada, 2005. 249-254.

[19] 刘彬，王文吉，李雅倩，等. 基于能量因素的无线传感器网络关键节点判定算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(7):1728-1734
LIU B, WANG W J, LI Y Q, *et al.* Crucial node decision algorithm based on energy in WSN[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(7):1728-1734.

作者简介：

刘彬（1953-），男，黑龙江五常人，燕山大学教授、博士生导师，主要研究方向为信号估计与识别、轧机扭振动力行为及测量技术、智能传感及无线传感器网络关键技术、智能控制技术及在水泥生产中的应用等。

孙雅静（1991-），女，河北承德人，燕山大学硕士生，主要研究方向为无线传感器网络容错拓扑建模及网络性能分析。

刘浩然（1980-），男，黑龙江五常人，燕山大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为无线传感器网络拓扑控制、工业故障检测等。

尹荣荣（1985-），女，甘肃白银人，燕山大学讲师，主要研究方向为无线传感器网络拓扑容错性分析及控制。