

文章编号:1007-5321(2018)05-0103-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2018-172

一种物联网系统层次型抗毁性拓扑构建方法

陈雯柏, 崔晓丽, 郝 翠, 王文凯

(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100101)

摘要: 针对物联网系统复杂应用环境中由关键节点失效导致的系统拓扑结构的脆弱性问题,提出了一种抗毁性 k -连通拓扑结构的构建方法. 首先把系统分成若干个互不交叠的簇,然后对网络中存在的关键节点进行检测,并利用簇头节点的移动性构建以关键节点为中心的局部 k -连通拓扑结构,达到去除关键节点和提高网络抗毁性的目的. 构建了簇间的 k -连通拓扑结构,给出了物联网智能安防系统应用仿真实验,并通过节点的介数中心性、网络的平均连通度和网络的鲁棒性验证了所提抗毁性方案的可行性和有效性.

关键词: 物联网系统; 关键节点; 局部 k -连通拓扑结构; 抗毁性

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

Hierarchical Invulnerability Topology Construction Method for IoT System

CHEN Wen-bai, CUI Xiao-li, HAO Cui, WANG Wen-kai

(School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: To enhance the system topology vulnerability caused by the failure of critical nodes in the Internet of Things (IoT) system based complex application environments, a construction method of the survivable k -connected topology is proposed. Firstly, all nodes of network system are classified into non-overlapping clusters. Then, the cut points existed in the network are detected, and the cut point centered a local k -connected topology is constructed by use of the motion of the cluster head nodes, so that the critical nodes can be effectively removed to improve the network survivability. Finally, all the cluster head nodes are selected to form the backbone network which also acts as the global inter-cluster k -connected topology. The proposed method is evaluated by the simulation in an IoT-based intelligent monitoring system. The results proves the feasibility and validity of the proposed method in terms of the betweenness centrality of nodes, the network average connectivity and the network robustness.

Key words: internet of things system; critical nodes; local k -connected topology; invulnerability

物联网作为第四次工业革命核心技术之一,通过人与人、人与物以及物与物之间的互联,实现环境与状态信息实时共享以及智能化采集、传输、处理、执行^[1-2]. 物联网系统终端局部信息交互,进而实现物联网系统整体规划和人类社会与物理系统的融合. 通过可靠感知物理世界人、机、物、环境异构全要素信息,将动态网络环境下的海量感知数据实时

传输至信息层,集成规约多源多模态异构数据,并精准控制混杂动态环境下异构执行器资源协同工作^[3-4].

在复杂和恶劣的应用环境中,由于能量的有限性、任务的对抗性与节点感知的局限性等因素容易导致系统节点失效进而引发系统拓扑结构的断裂,从而影响系统的功能和任务的完成. 网络拓扑结构

的抗毁性和健壮性是物联网系统协同完成任务的关键。Fan 等^[5]提出了无线传感器网络的概率覆盖算法来增强网络拓扑的覆盖面积。Dai 等^[6]构建了一个 k -连通的 k -支配集作为骨干网络来平衡效率和网络的容错性。Basu 等^[7]通过移动网络中的某些节点到新的位置,使网络构建成双连通的,以提高网络的抗毁性。Rosset 等^[8]提出分布式 k -连通算法,对每个 sink 节点的邻居节点进行 k -值检测。Varadarajan 等^[9]针对移动机器人网络,提出了一种新颖的基于节点移动的拓扑控制方案,将静态节点和移动节点放在一个不规则的六边形中,结合动态拓扑管理,提高网络的可靠性和连通性。基于分簇的层次型拓扑结构可有效对节点进行管理,节点能耗得以减少并具有良好的网络可扩展性^[10-11]。笔者着眼于关键节点导致的物联网系统拓扑结构的脆弱性问题,提出一种抗毁性能较强的层次型物联网系统拓扑构建方法,并以物联网智能安防应用系统进行了仿真验证。

1 系统模型与相关定义

系统模型:将 n 个移动节点随机放置在二维方形监控区域中。用无向图 $G = (V, E)$ 表示节点拓扑结构。如果两个节点 i 和 j 之间可以进行正常的信息交互,则 $\rho_{ij} = 1$, 否则 $\rho_{ij} = 0$ 。系统中,若任意节点对之间的欧式距离小于等于节点的通信半径 R , 即 $\text{dis}(v_i, v_j) \leq R$, 并且 $\rho_{ij} = 1$, 则说明节点 i 和 j 能够进行信息交互。其中 $\lambda_n = \{1, 2, \dots, n\}$, $V(G) = \{v_i, i \in \lambda_n\}$ 为系统节点集合, $E(G) = (v_i, v_j) \mid v_i, v_j \in V \& \text{dis}(v_i, v_j) < R \& \rho_{ij} = 1$ 表示系统边集,即系统中节点之间存在的通信链路集合。

笔者引入以下相关定义与假设:

定义 1 在图 G 中,如果顶点对 v_i 与 v_j 间存在两条路径,并且除了顶点 v_i 与 v_j 之外这两条路径中不存在相同顶点,那么这两条路径就被称作顶点不相交路径。

定义 2 如果无向图 G 任意两个节点之间至少存在一条路径,那么这个图是单连通的。

定义 3 若无向图 G 至少含有 3 个顶点,当且仅当任意两个顶点 $i, j \in V$ 之间存在两条顶点不相交的路径 (i, j) , 则图 G 是双连通的。

定义 4 在图 $G(t) = (V(t), E(t))$ 中的 t 时刻,如果去除其中任意 $k-1$ 个节点,不会使图的连通分量增加,也就是说,如果任意两个节点之间至少

存在 k -条顶点不相交的路径,那么图 G 是 k -连通的。

定义 5 对于无向图 $G = (V, E)$ 中的任意一个节点 v_i ,若存在另外一个节点 v_j ,使得这两个节点之间的欧式距离 $\text{dis}(v_i, v_j)$ 小于等于通信半径 R , 即 $\text{dis}(v_i, v_j) \leq R$, 并且满足 $\rho_{v_i v_j} = 1$, 则将节点 v_j 称作节点 v_i 的 1-跳邻居节点(1-跳邻居),记作 $v_j \in N^1(v_i)$ 。

定义 6 节点 v_i 的 1-跳邻居图由 v_i 、 v_i 的 1-跳邻居节点 $N^1(v_i)$ 和这些节点间构成的边集组成,即 $G_{v_i}^1 = (v_i \cup N^1(v_i), E_{v_i}^1) \subset G$, 其中 $E_{v_i}^1 = \{(v_i, v_j) \mid \text{dis}(v_i, v_j) \leq R \& \rho_{v_i v_j} = 1\}$, $v_j \in N^1(v_i)$ 。

假设 1 系统初始化阶段,节点之间拓扑结构是一个连通的网络。每个节点具有唯一 ID,能够获取自身位置信息,通信半径 R 可调整,平时处在静止状态,能按需移动。

2 系统模型与相关定义

k -连通拓扑结构基于层次型分簇拓扑构建。分簇是将整个网络划分为若干个单元簇,每个簇由 1 个簇头节点和若干个簇内成员节点组成。簇头构成高一级的骨干网络,进而使网络形成层次型的拓扑结构。簇头负责簇内节点数据采集和簇间数据转发。分簇有利于节点的层次化管理与系统的扩展。 k -means 算法可使样本聚类成 k 个簇。

笔者提出的 k -连通拓扑控制方法由 3 阶段组成:第 1 个阶段是节点分簇;第 2 个阶段是簇内局部 k -连通拓扑控制;第 3 个阶段是簇间 k -连通拓扑控制。

1) 采用 k -means 算法把系统节点分成若干个互不相交叠的簇。首先随机选取 k 个聚类质心,计算样本距离 k 个聚类质心的距离,将样本归类为距离最小时的质心对应的类,然后重新计算该类的质心,直至所有 k 个质心向量都不再发生变化。

2) 当簇内节点拓扑好之后,在每个簇中检测关键节点,采用 Harary 图的思想,通过给关键节点的 1-跳邻居节点逆时针排序,使关键节点的 1-跳邻居节点构建成连通的拓扑结构,从而使得关键节点与其 1-跳邻居节点共同构建成局部的 2 连通或者局部 3 连通拓扑结构来达到去关键节点的目的,消除关键节点对网络的影响。

3) 在去除关键节点的每个簇中选举簇头,簇头之间同样采用 Harary 图来构建 k -连通的拓扑结构。

2.1 簇内局部 k -连通拓扑结构的构建

分簇后,给定每个节点相同的通信半径。节点

的接收信号强度的计算公式为

$$R = P_t - L(d_0) - 10\eta \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

其中: P_t 是节点发射功率, d_0 是参考距离, $L(d_0)$ 是参考距离为 d_0 时的传输损耗, η 是路径损耗指数。 d 是发送方与接收方的距离。当 d 为节点的通信半径时,此时 R 为接收信号强度的阈值 ($R_{\text{threshold}}$)。当节点 v_i 发送信号时,节点 v_j 的接收信号强度 R 大于接收信号强度阈值时,则节点 v_i 和节点 v_j 存在信息交互边 (v_i, v_j) 。

每个簇中关键节点的判定是构建簇中局部 k -连通拓扑结构的基础。本文使用基于深度优先搜索 (DFS) 的方法来判断关键节点。

深度优先搜索的过程简要来说是对每一个可能的分支路径深入到不能再深入为止,而且每个节点只能访问 1 次。无向图用 DFS 遍历时,能获得 1 棵 DFS 搜索树。图 1(a) 是无向图,图 1(b) 是 DFS 搜索树。遍历开始的起始顶点称为根节点。在 DFS 过程中访问未访问过的顶点时所经过的边,称为树边 (父子边),如图 1(b) 中的实线所示。在 DFS 过程中碰到已经访问过的顶点时所经过的边,称为回边 (返祖边、后向边)。在 DFS 搜索树,存在两类节点可能是关键节点:

1) 根节点 u 至少有两棵子树,则 u 为关键节点;

2) 对于非叶子节点 u 的子树中的节点,若其不存在指向 u 的祖先节点的回边,则去除 u 之后,搜索树中的其他部分与 u 的子树的节点不再连通,则 u 为关键节点。

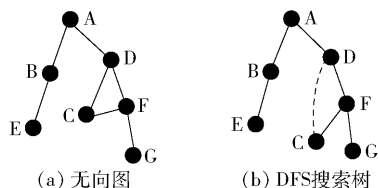


图1 无向图的深度优先搜索

在深度优先搜索过程中,节点 u 被遍历到的序号用 $\text{num}(u)$ 表示,节点 u 或 u 的子树用非父子边能达到的深度最小的祖先节点用 $\text{low}(u)$ 表示,那么 $\text{low}(u)$ 的计算公式为

$$\text{low}(u) = \begin{cases} \min\{\text{low}(u), \text{low}(v)\}, & (u, v) \text{ 为树边} \\ \min\{\text{low}(u), \text{num}(v)\}, & (u, v) \text{ 为树边} \end{cases} \quad (2)$$

其中: (u, v) 为回边,并且 v 不为 u 的父节点。

对于第 1 类关键节点,若只存在一颗子树,即整个图是强连通,则删掉根节点,必然不会变为多个子图,所以也不是关键节点。只有至少存在两颗子树,删除根节点,才能变成多于一个的子图,此时根节点才是关键节点。

对于第 2 类关键节点,当 (u, v) 为树边且满足 $\text{low}(v) > \text{num}(u)$ 时,节点 u 才能成为关键节点,也即是 u 的子孙唯有经过 u 才能访问 u 的祖先。若删除 u ,则至少分成两个子图。

识别出每个簇中的关键节点之后,采用 Harary 图的思想来构造簇中局部 k 连通的拓扑结构 $H(k, n)$ 。其中 k -表示网络的连通度, n 表示节点的个数。将 n 个节点逆时针标记为 $1 \sim n$,按照下面的规则构造 k -连通的 Harary 图。

1) 如果所需构建的连通性 k 是偶数,令 $k = 2m$,然后将每个节点与每个方向上与该点相邻的 m 个节点相连,即可以得到所需构建的拓扑图。

2) 如果所需构建的连通性 k 是奇数,节点的个数 n 是偶数,则令 $k = 2m + 1$,首先构造出 $H(2m, n)$,然后当 $1 \leq i \leq \frac{n}{2}$ 时,使顶点 i 和顶点 $\frac{i+n}{2}$ 相连,即可得到所需构建的拓扑图。

3) 如果所需构建的连通性 k 是奇数,节点的个数 n 是奇数,则令 $k = 2m + 1$,首先构造出 $H(2m, n)$,当 $1 \leq i \leq \frac{n-1}{2}$ 时,顶点 i 和顶点 $i + \frac{n+1}{2}$ 相连,然后 1 号顶点再和 $\frac{n+1}{2}$ 相连,即可以得到所需构建的拓扑图。

当关键节点的 1-跳邻居集 (1-跳邻居节点) 个数 n 为 2 时,则可以移动关键节点的邻居节点,使得关键节点的 1-跳邻居节点进入彼此的信息交互范围内。则关键节点和其 1-跳邻居节点 3 个节点就构成了局部 2 连通网络 (局部双连通图),删除任意一个节点,剩余两个节点依然可以进行通信,相比于之前的局部单连通网络,双连通图网络的连通度得到增强,进而提升了系统的抗毁性。

当关键节点的 1-跳邻居节点数 n 大于等于 3 时,可以将这 n 个节点构建一个 $H(k, n)$ 图,则 $H(k, n)$ 图与关键节点一起构成了一个局部 $k + 1$ 连通的拓扑结构,从而达到去除关键节点的目的。当关键节点的邻居节点数比较多时,可以仅构建 $H(2, n)$ 图,最终构建成为以关键节点为中心的局部 3

连通图。

当检测到系统存在关键节点时,关键节点的 1-跳邻居节点根据相对关键节点的极角的大小进行逆时针排序后,再根据构建 Harary 图的规则,关键节点可以计算出所需添加的信息交互边,当关键节点发现某些节点的发射功率不能达到所需的发射功率时,关键节点就发送相应的位置调整信息来调节此节点的位置,使其进入其他节点的信息交互范围内,成为彼此的邻居节点。如果节点移动后产生新的关键节点则继续对新的关键节点根据构建 Harary 图的规则去关键节点。

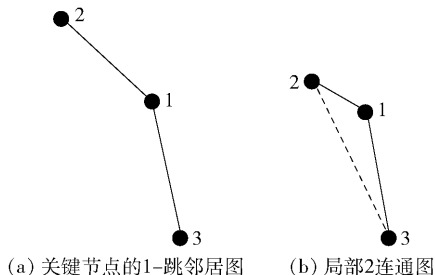


图 2 局部 2-连通拓扑结构构建实例

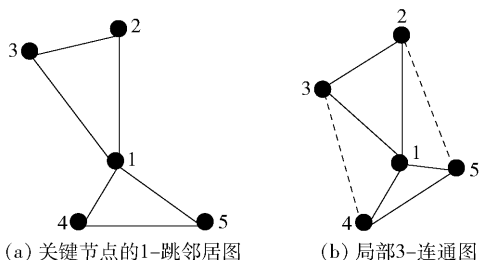


图 3 局部 3-连通拓扑构建实例

图 2 和图 3 给出了局部 k 连通(局部 2-连通或者局部 3-连通)构建算法的实例。图 2(a)中 1 号节点是关键节点,2、3 号节点是它的 1-跳邻居节点,从图 2(a)中可以看出 2 号节点和 3 号节点需要添加新的信息交互边来构建以关键节点为中心的局部 2 连通图。关键节点根据 Harary 图首先计算出两邻居节点通信所需的发射功率,如果两节点的传输功率小于所需的发射功率,那么关键节点告知节点 2 向节点 3 的位置移动,直到进入节点 3 的信息交互范围内。从而得到期望的如图 2(b)所示的局部 2-连通图。图 3(a)中 1 号节点是关键节点,2~5 号节点是关键节点的 1-跳邻居节点,从图 3(a)中可以看出 5 号和 2 号节点,3 号和 4 号节点需要添加新的信息交互边来构建以关键节点为中心的局部 3 连通图。关键节点根据 Harary 图,首先计算出各个节点通信

所需的发射功率,如图 3(a)中 5 号和 2 号节点的发射功率小于 5 号和 2 号节点通讯所需的功率,那么关键节点告知节点 5 向节点 2 的位置移动,直到进入节点 2 的信息交互范围内。同理,如果 3 号节点和 4 号节点的发射功率小于 3 号节点和 4 号节点通信所需的功率,那么关键节点告知节点 3 向节点 4 的位置移动,直到进入节点 4 的信息交互范围内。从而得到期望的如图 3(b)所示的局部 3-连通图。

2.2 簇间 k -连通拓扑结构的构建

簇内局部 k -连通拓扑结构构建好之后,选出每个簇的簇头来构建簇间 k -连通拓扑结构。簇头的选举依据簇内节点的权值 W 的大小来确定。因为用 k -means 聚类算法进行分簇时会有 k 个聚类质心,距离聚类质心越近的节点其簇内其他节点进行通信所需的总通信代价越小,无线网络中节点可达邻居节点数通常为 6~8,此时网络的性能较好^[12]。权值公式为

$$W = w_1 \frac{1}{D_1} + w_2 \frac{D_2}{7} \quad (3)$$

其中: w_1 和 w_2 为权重因子, D_1 为节点到聚类质心的距离, D_2 为节点的度。在每个簇中选择权值最大的节点为簇头,如果两节点权值大小相同则选择节点编号较小的一个为簇头。

簇头节点之间的 k -连通拓扑结构的构建同样也采用 Harary 图的思想。构建簇间 k -连通拓扑结构以及簇头节点将收集到的簇内信息进行数据传输时,簇内成员节点可以进入休眠阶段以节省能量。

簇间拓扑控制阶段,簇头的通信半径可变。每个簇头节点根据 Harary 图的规则计算出构建 k -连通拓扑结构所需的最大通信半径即最大发射功率,作为其通信半径。构建 k -连通拓扑结构至少有 $k+1$ 个节点。如图 4 所示,用 4 个簇头节点构建 3 连通拓扑结构为例来阐述簇头节点最大通信半径的确定。图 4 中首先选取位置最低的一个节点作为 1 号节点,然后其他簇头节点按照与 1 号节点的极角的大小逆时针排序的编号为 2、3 和 4。按照 Harary 图的规则,需要将 1 号与 2 号节点、2 号与 3 号节点、3 号与 4 号节点、1 号与 3 号节点、2 号与 4 号节点进行通信来构建 3 连通的拓扑结构图。1 号节点与 2、3、4 号节点进行通信所需的半径分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 。因为图中 R_1 和 R_3 都小于 R_2 ,所以 1 号与 2、3、4 号节点进行通信所需的半径至少为 R_2 。同理,2 号节点所需的通信半径至少为 R_4 ,3 号节点所需的通信半径至

少为 R_2 , 4 号节点所需的通信半径至少为 R_4 .

如果系统中簇头受到恶意攻击或者由于其他原因失效,可以依据簇头选取的原则,再次从簇内选取节点以代替失效的簇头节点.

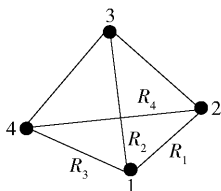


图4 3-连通图构建实例

基于第2节所述拓扑构建思路,算法策略伪代码如下如算法1所示.

算法1 抗毁性 k -连通拓扑构建算法

输入: 网络中的参数;

do k -means;

while($t = nUCT$)

do DFS 检测每个簇中的关键节点;

if 存在关键节点

then 识别出存在的关键节点;

构建以关键节点为中心的局部 k -连通拓扑结构;

if 网络中不存在簇头或者簇头失效

then 选举出簇头;

构建簇间 k -连通拓扑结构;

系统进行信息的收集和传递;

end

该算法对网络中关键节点进行实时检测,以避免关键节点失效导致网络分割及网络协同任务的失败.

3 仿真实验与评价分析

采用 Matlab 仿真平台,对本文抗毁性拓扑构建方法模拟并分析其性能. 双连通是网络抗毁性能的基本需求,另一方面当节点的连通度大于4时,不仅会造成网络的通信能耗过大,还会使系统运动约束增多. 因此,以簇头的拓扑为3-连通为例来验证本文算法的有效性. 监控区域的大小设为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, 节点的数目为40个,节点的通信半径设为30m,分簇个数为4,簇头的拓扑为3-连通.

系统分簇及簇内拓扑邻居关系如图5所示. 利用关键节点检测算法检测到网络有2个簇存在关键节点,分别是30、38和22号节点. 如果这3个关键

节点遭受破坏,那么将会造成簇内网络的分割,被分割的节点之间就无法进行通信,进而造成协同控制任务的失败,所以需要对关键节点加以保护. 从图5可看出,节点号为30的关键节点的1-跳邻居节点按照极角的大小进行逆时针排序后的顺序为10、31、35、29、33. 根据 Haraary 图的思想,需要添加新的信息交互边 29-33、33-10 来构建以关键节点为中心的局部3-连通拓扑结构来去除关键节点. 所以需要移动29号节点让29和33号节点相互通信,移动33号节点让33和10号节点相互通信. 节点号为38的关键节点的邻居节点按照极角的大小进行逆时针排序后的顺序为16、24、36、8、28、4、32,需要添加新的信息交互边 8-28 和 32-16 来构建以关键节点为中心的局部3-连通拓扑结构. 同理,22号节点需要添加新的信息交互边 3-15、21-3. 去除关键节点后任意删除簇内的两个节点之后,网络还是连通的,增强了系统的抗毁性.

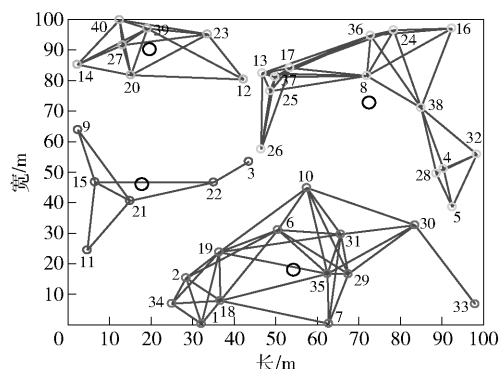


图5 簇内有关键节点的拓扑图

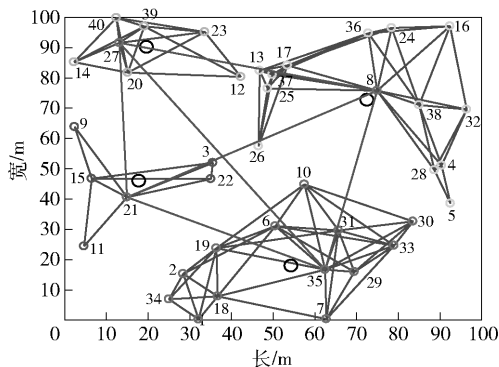
簇内去除关键节点后的网络拓扑结构如图6所示. 去除关键节点后,依据规则选举出簇头节点,其编号是27、21、35、8,簇头间的3-连通拓扑结构如图6中所示. 任意2个簇头节点失效,剩余的簇之间还是可以进行通信,可增强系统的抗毁性.

笔者利用网络的节点介数中心性、网络的平均连通度、网络的鲁棒性来对比分析每个簇内去除关键节点前后网络的抗毁性能变化.

3.1 介数中心性评价

节点 p 的介数^[13-14] B_p 反映了其在整个系统中的影响力,定义为网络中所有最短路径之中,经过节点的最短路径数占有所有最短路径的比值,介数 B_p 的计算公式为

$$B_p = \sum_{(i,j)} \frac{g_{ipj}}{g_{ij}} (i, j \neq p, i \neq j) \quad (4)$$

图 6 簇内去关键节点后且簇头 k -连通的拓扑图

其中: g_{ipj} 表示经过节点 p 的节点 i, j 间的最短路径的个数, B_p 的值越大说明节点 p 在系统中的影响力和重要性越大。

网络中节点的介数中心性的计算公式为

$$W_p = \frac{2 \sum_{(i,j)} \frac{g_{ipj}}{g_{ij}}}{n(n-1)} \quad (5)$$

其中: n 是网络中总的节点个数, 则网络中节点间的最短路径个数是 $n(n-1)/2$ 。

去除关键节点前系统中节点介数中心性大小分布如图 7 所示, 图 7 中编号为 38 的节点介数最大, 这是因为关键节点两侧的节点进行通信都要经过关键节点, 这与实际情况是相符合的。从图 5 可以看出如果节点编号为 30、22 的关键节点失效, 只会分别造成节点 33 和 3 与其所属簇的其他节点不连通, 所以图 7 中 30 和 22 号节点的介数小于 0.005。当构建以关键节点为中心的局部 3 连通拓扑结构后, 各节点的介数大小如图 8 所示。从图 8 可知, 关键节点 22、30 和 38 的节点介数都有所下降, 但是节点 16、8、28、4、33 号节点的介数也都相应增大了, 这说明对关键节点进行保护之后, 关键节点两侧节点进行通信时, 可以通过其他节点进行转发, 关键节点不

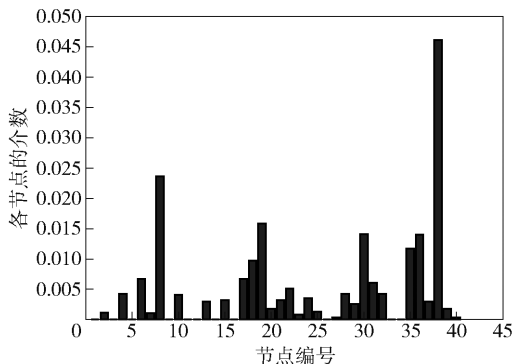


图 7 簇内去关键节点前网络中节点介数中心性大小分布

再是其两侧节点进行通信的必经节点, 这与实际情况是相符的。

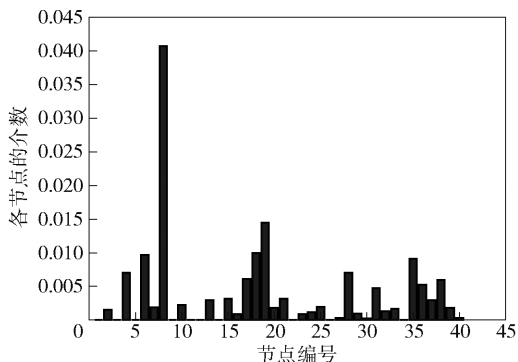


图 8 簇内去关键节点后网络中节点介数中心性大小分布

3.2 网络鲁棒性评价

网络鲁棒性^[14]是用来衡量移除任意节点后网络中的剩余节点之间仍然能够保持连通能力的平均影响力, 其定义是删除任意节点后网络中仍可连通的节点对数与网络中总的节点对数之比的均值。假设移除某个节点后, 网络中剩下的节点集合是 G_k , 网络鲁棒性 n_R 计算公式为

$$n_R = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in G_k} \sum_{j > i} l_{ij} \quad (6)$$

其中: n 表示网络中总节点数目, l_{ij} 表示网络中仍连通节点的对数, 如果节点 i, j 之间存在路径, 则 $l_{ij} = 1$, 否则 $l_{ij} = 0$ 。

3.3 平均连通度评价

节点的度^[14]反映了其对网络连通性影响的大小, 通常是指与某个节点直接相连的边个数。则节点 i 的度 k_i 的计算公式为

$$k_i = \sum a_{ij} \quad (7)$$

其中: 如果节点 i 和节点 j 直接相连, 则 $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$ 。

网络的平均度 (平均连通度) D 是网络中所有节点度的平均值, D 的计算公式为

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n} \quad (8)$$

在去关键节点前和去关键节点后, 网络的性能对比分析数据如表 1 所示。

从表 1 可知, 对于含有关键节点的网络: 网络的平均连通度为 4.9; 网络的鲁棒性是删除关键节点后的鲁棒性, 其值为 0.186 19。对于根据去关键节点策略去关键节点后的网络: 网络的平均连通度为

表 1 网络性能对比分析

性能指标	含关键节点	去关键节点	提高率/%
平均连通度	4. 900 00	5. 400 00	9. 26
鲁棒性	0. 186 19	0. 262 76	29. 14

5.4;网络的鲁棒性是删除原有关键节点后网络的鲁棒性,其值为 0.262 76. 因为去关键节点后网络中产生了新的信息交互边,所以网络的平均连通度提高了 9.26%. 网络的鲁棒性提高了 29.14%,说明簇中去除关键节点后增强了网络的抗毁性.

3.4 簇头拓扑构建后全网介数中心性评价

在簇头拓扑构建阶段,簇头依据 Harary 图的规则构建 3 连通拓扑结构. 簇头拓扑好之后,整个网络的介数大小如图 9 所示.

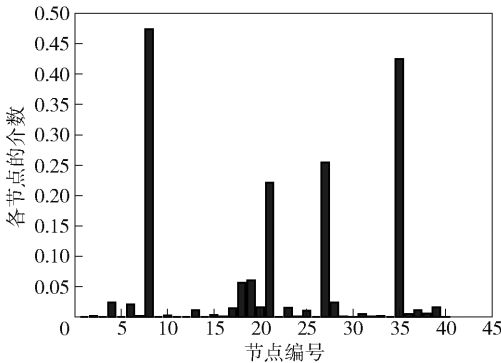


图 9 簇头拓扑后网络中节点介数大小分布

从图 9 中可以看出,簇头节点即 8、21、27、35 号节点的介数较大,这是因为簇间信息的传递都依靠簇头进行转发. 但是在簇之间进行信息传递时,簇内节点可以进入休眠状态来提高节点能量利用率. 由于在无线网络中,传递数据包时间延时主要产生在节点接收、处理以及发送数据的过程中,而当网络负载相同时,数据包的时间延迟主要与传输路径上经过的跳数有关. 在图 6 中,11 号节点收集到的信息传达到 27 号节点只需经过 21 号簇头即可到达 27 号节点. 但是,如果不进行分簇的话,11 号节点到达 27 号节点的路径为 11-15-9-14-27,即至少要经过 4 跳的距离. 所以说,分簇拓扑且簇头进行 k -连通的拓扑结构,不仅网络的实时性较好,而且提高了系统的抗毁性.

4 结束语

对物联网智能安防系统抗毁性拓扑结构进行了研究,并针对关键节点导致的拓扑结构的脆弱性,提

出了一种较强抗毁性能的层次型物联网系统拓扑构建方法. 在对网络分簇的基础上,在每个簇内检测关键节点,并利用节点的移动性构建了以关键节点为中心的局部 k -连通(2-连通或 3-连通)拓扑结构,抽取簇头构成簇间 k -连通的骨干网络. 通过仿真实验对节点的介数中心性、平均连通度和鲁棒性进行评价,结果表明笔者所提出的方法能很好地增强系统拓扑结构的抗毁性.

参考文献:

[1] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1-9.
Sun Qibo, Liu Jie, Li Shan, et al. Internet of things: summarize on concepts, architecture and key technology problem[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3): 1-9.

[2] 王飞跃, 张俊. 智联网: 概念、问题和平台[J]. 自动化学报, 2017, 43(12): 2061-2070.
Wang Feiyue, Zhang Jun. Internet of minds: the concept, issues and platforms[J]. ACTA Automatica Sinica, 2017, 43(12): 2061- 2070.

[3] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
Tao Fei, Cheng Ying, Cheng Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.

[4] Mumtaz S, Alsohaily A, Pang Z, et al. Massive internet of things for industrial applications: Addressing wireless IoT connectivity challenges and ecosystem fragmentation [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 28-33.

[5] Fan X G, Yang J J, Wang H. A probabilistic overlay enhancement algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal of Software Engineering, 2016, 27(2): 418-431.

[6] Dai G Y, Shi W Y, Ying K Z, et al. A new approach to the WSN fence based on the two deployment of mobile nodes [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 97-104.

[7] Basu P, Redi J. Movement control algorithms for realization of fault-tolerant Ad hoc robot networks [J]. IEEE Network, 2004, 18(4): 36-44.

- allocation for M2M devices in multicell systems [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(6): 834-837.
- [5] Zhang N. An improved random access procedure for M2M communications [C] // IEEE WCNC. Doha: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [6] Kim T, Jang H S, Sung D K. An enhanced random access scheme with spatial group based reusable preamble allocation in cellular M2M networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1714 - 1717.
- [7] Ko K S, Kim M J, Bae K Y. A novel random access for fixed-location machine-to-machine communications in OFDMA based systems [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(9): 1428-1431.
- [8] Jang H S, Kim S M, Park H S. An early preamble collision detection scheme based on tagged preambles for cellular M2M random access [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 5974-5984.
- [9] 3GPP. Physical random access channel [EB/OL]. [S. l.]: 3GPP Press, 2016 (2016-12-05) [2018-08-05]. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.211.
- [10] 3GPP. Random Access procedure [EB/OL]. [S. l.]: 3GPP Press, 2016 (2016-12-05) [2018-08-05]. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.300.
- [11] 3GPP. TS 36. 321, V14. 1. 0, 5. 1 random access procedure [EB/OL]. [S. l.]: 3GPP Press, 2016 (2016-12-5) [2018-08-05]. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.321.

(上接第109页)

- [8] Rosset V, Paulo M A, Cespedes J G, et al. Enhancing the reliability on data delivery and energy efficiency by combining swarm intelligence and community detection in large-scale WSN [J]. Expert Systems with Application, 2017, 78(15): 89-102.
- [9] Varadarajan K M, Vincze M. Mobility aware topology control framework for dynamic multi-robot networks [C] // International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics. Miedzyzdroje: [s. n.], 2011: 272-277.
- [10] Park H, Hutchinson S A. Fault-tolerant rendezvous of multirobot systems [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(3): 565-582.
- [11] Wang Q, Chen J, Fang H. A localized K -connectivity topology control algorithm in multi-agent networks [C] // Control Conference (CCC). [S. l.]: IEEE, 2012: 6315-6320.
- [12] 王强, 陈杰, 方浩. 一种多智能体系统抗毁性拓扑结构构建方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2014(4): 356-362.
- Wang Qiang, Chen Jie, Fang Hao. A Construction method of fault-tolerant topology for multi-agent systems [J]. PR&AI, 2014(4): 356-362.
- [13] 郭晓成, 马润年, 王刚. 复杂网络中节点重要性综合评价方法研究 [J]. 计算机仿真, 2017, 34(7): 264-268.
- Guo Xiaocheng, Ma Runnian, Wang Gang. Research on comprehensive evaluation method of node importance in complex network [J]. Computer Simulation, 2017, 34(7): 264-268.
- [14] 李文锋, 符修文. 无线传感器网络抗毁性 [J]. 计算机学报, 2015, 38(3): 625-647.
- Li Wenfeng, Fu Xiuwen. Survey on invulnerability of wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(3): 625-647.