

基于局域世界的无线传感器网络分簇演化模型

符修文, 李文锋

(武汉理工大学 物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 当前无线传感器网络无标度演化模型研究往往将网络视为同质网络, 且未充分考虑网络在真实情形下的演化特征, 导致所获网络拓扑与实际网络差异明显。因此, 基于局域世界理论, 考虑无线传感器网络典型分簇结构、能耗敏感与真实网络中普遍存在的节点与链路退出的动态性行为等特征, 提出无线传感器网络分簇演化模型。该模型与同类研究成果相比, 更为接近真实网络情形。利用平均场理论推导出此模型具有无标度特征。通过研究拓扑生长对网络容错性能影响, 发现扩大局域世界规模与提升饱和度约束上限可有效提升网络容错性能。与之相反, 簇头比例与节点删除概率的上升将导致网络容错性能的下降。

关键词: 无线传感器网络; 无标度; 拓扑演化; 局域世界; 容错性

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Evolutionary model of heterogeneous clustering wireless sensor networks based on local world theory

FU Xiu-wen, LI Wen-feng

(School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Current research on the scale-free evolutionary model of wireless sensor networks (WSN) treated each network as a homogenous one and does not take into account the evolutionary characteristics of the network in realistic scenarios, thus leading to significant differences between homogenous networks and realistic ones. Therefore, based on local-world theory, a heterogenous evolution model of WSN in relation to cluster-structure, energy-sensitivity and dynamic behavior of WSN (e.g., failures of nodes and links) was proposed. Compared with previous research results, the proposed model is closer to reality. By using the mean-field theory, the scale-free feature is demonstrated. Moreover, by studying the impacts of topology growth on error tolerance of the network, it is proved that enlarging the size of the local-world and enhancing the upper limit of degree is able to improve the network performance in terms of error-tolerance, while an increase in the cluster proportion and deletion probability led to the degradation of the network error tolerance.

Key words: wireless sensor network; scale-free; topology evolution; local-world; error-tolerance

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor networks) 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。布置在自然环境中的 WSN, 常会因为硬件故障、自然灾害等随机原因导致节点失效。失效节点

会使原本连通的网络拓扑分割, 明显降低网络的连通与覆盖度, 甚至导致全局网络瘫痪^[1,2]。因此, 通常将 WSN 应对此类随机失效情形的容忍能力定义为 WSN 的容错性能, 容错性能的高低是衡量 WSN 综合性能好坏的重要标准。但由于规模巨大、资源受限、传递时延、有向传输等内在因素产生的非线性网络行为难以预测, 如何从系统的角度建立容错

收稿日期: 2014-07-21; 修回日期: 2014-12-03

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划基金资助项目 (2012BAJ05B07); 国家自然科学基金资助项目 (61305110); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (135118003)

Foundation Items: The Twelfth-five National Science Pillar Project (2012BAJ05B07); The National Natural Science Foundation of China (61305110); The Fundamental Research Funds for Central Universities (135118003)

性能较优的 WSN 拓扑一直是一个研究难题^[3]。20 世纪末以来，复杂网络已成为各学科领域重要的分析工具和研究手段，复杂网络以系统学的观点来研究客观世界中存在的大规模网络，如 Internet 网络、社会关系网络、科学家合作网络等。Barabasi 和 Albert 从动态的、增长的观点提出了复杂网络具有幂律度分布的形成机理，称之为无标度 (scale-free) 网络，并建立了 B-A^[4]无标度网络模型。无标度网络节点度分布 $P(k)$ 符合幂率分布，这就决定了网络中少数节点占用了绝大部分连接，而网络中绝大多数节点度数较低。当网络面临节点硬件故障或自然灾害等随机失效情形时，少数度数较高的中心节点因在网络中所占比例较低，所以失效概率较小，而大多数度数较小的节点尽管因所占网络比例较大，失效概率较高。但该类节点的失效并不会显著影响网络的整体性能。因而，无标度网络具有较好的容错性能。无标度网络及其相关理论为建立容错性能较优的 WSN 拓扑提供一种新的思路与方法。

B-A 模型^[4]基本思想是通过择优连接促进网络增长，使所生成网络具备无标度特征。具体演化机制描述如下。

1) 增长：从一个具有 m_0 个节点的网络开始，每次引入一个新的节点，与 m 个已经存在的节点相连，这里 $m \leq m_0$ 。

2) 连接：一个新节点和一个已经存在的节点 i 相连的概率 $\prod(k_i)$ 与节点 i 的度 k_i 成正比，即

$$\prod(k_i) = \frac{k_i}{\sum_{j=1}^{s(t)} k_j} \quad (1)$$

其中， $S(t)$ 为当前时刻网络节点总数。在经过 t 个时间步后，产生一个具有 $S(t)=m_0+t$ 个节点， mt 条边的网络。经过长时间演化，网络标度趋近于固定。网络度分布服从幂率分布 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ ，幂律指数 γ 为 3，与平均度值和网络节点数无关。B-A 无标度网络模型通过全局计算每个节点的择优连接概率，得到幂律形式的网络度分布。

然而，在许多现实网络中，由于局域世界连接性的存在，每一个节点都有各自的局域世界，因而仅能使用网络的局部连接信息。基于该考虑，Li^[5] 提出局域世界 (L-W, local-world) 模型。L-W 模型与 B-A 模型的区别在于 m 个节点是从局域世界 Ω 中优先选取的。而局域世界 Ω 是由网络中随机选取的

$M (M \geq m)$ 个已存在节点构成。显然，当 $M=m$ 时，L-W 模型仅保留增长机制而没有优先连接，网络度分布服从指数分布。当 $M=m_0+t$ 时，L-W 模型等价于 B-A 模型。当 $m < M < m_0+t$ 时， $P(k) \sim 2m^{\frac{1}{\beta}} k^{-\gamma}$ ，其中， $\gamma = \frac{1}{\beta} + 1$ 。显然，随着局域世界 M 从小慢慢增大，网络的度分布曲线从一条指数型的曲线逐渐地被“拉直绷紧”成为一条幂律型曲线。局域世界规模 M 越大，相应地演化网络度分布越不均匀，网络度分布会呈现出从指数分布到幂律分布之间的过渡演化特征。

在 B-A 与 L-W 模型基础上，众多学者从网络演化角度研究 WSN 的拓扑控制。Zhu 等^[6] 基于 L-W 模型，分别提出 2 种具备无标度特征的 WSN 演化模型 EAEM (energy-aware evolution model) 与 EBEM (energy-balanced evolution model)。在 EAEM 中，新节点优先连接剩余能量较高的节点，而在 EBEM 中，除考虑节点剩余能量外，新节点优先加入连接度较高的节点。实验表明，EBEM 在能耗及容错性能上明显优于 EAEM。在该机制中，为避免少数节点拥有过多连边而导致能量消耗过快。引入饱和度约束 k_{\max} ，限定节点所能拥有的最大连接数，而 k_{\max} 的大小取决于该节点能量 E 。文献[7]在此基础上对网络拓扑进一步细化，基于节点能量、通信流量与距离等因素，定义边权和节点强度，并以此作为新加入节点择优连接的依据，从而使节点度与边权均服从幂律分布。文献[8]则考虑真实环境下的 WSN 路径能量损耗问题，通过分析路径能耗最优的网络度分布规律，设计 WSN 无标度容错拓扑控制算法。但上述研究均将 WSN 视为同质网络，所得网络拓扑均为对等平面结构。但在绝大多数真实情形下，WSN 通过在网络中引入分簇结构，使网络具备明显的异质性。因此，Li 等^[9] 通过依照预设簇头比例 p 将新加入节点分为簇头节点与普通节点，并分别构建概率选择函数 $\prod(k_i)$ ，使 WSN 无标度演化模型具备典型分簇特征。在 WSN 中，节点能量资源严格受限，随着新节点和新链路的加入，节点能耗失效以及环境因素所引起的节点与链路失效都将导致 WSN 拓扑动态变化。基于该考虑，罗小娟等^[10] 提出一种能量感知的优胜劣汰演化模型，从而使网络表现出更为贴近实际的有增有减的动态演化过程。文献[11]则在此基础上对 WSN 动态演化行为进一步扩展，在原有增加与删除节点基础上，新增链路删除与补偿行为。除 B-A 模型与 L-W 模型，基于

随机行走 (R-W, random-walker) 的 WSN 演化模型也得到了越来越多学者的重视。陈力军等^[12]在利用 DEEG 簇生成算法对 WSN 进行分簇基础上, 基于 R-W 构造簇间演化机制, 使由簇头所组成的通信子网具有无标度特征。王亚奇等^[13]针对病毒入侵, 基于 R-W 构造具有无标度特征的 WSN 拓扑, 并提出相应免疫策略。由于“行走者”在游走过程中, 选择下一跳节点取决于邻域簇头节点剩余能量值 E , 网络能耗性能得到明显改善。但值得注意的是, 王与陈的模型都仅聚焦于簇间拓扑, 并未考虑簇内成员节点, 因此, 所得整体网络拓扑性能并未得到有效验证。尽管当前 WSN 无标度演化模型研究众多, 但仍与真实 WSN 情形存在明显差异。为更好说明相关研究仍存在问题, 在表 1 中对其进行比较说明。

相关研究	能耗敏感	分簇结构	饱和度约束	优胜劣汰	理论模型
Zhu ^[6]	√		√		L-W
张德干 ^[7]	√				B-A
刘浩然 ^[8]	√				B-A
Li ^[9]	√	√			L-W
罗小娟 ^[10]	√		√		B-A
姜楠 ^[11]			√	√	B-A
陈力军 ^[12]	√	√			R-W
王亚奇 ^[13]	√	√			R-W

本文在分析上述研究优点与不足的基础上, 基于 L-W 模型, 提出一种新的 WSN 分簇拓扑演化模型。该演化模型具有如下特点: 1) 所得网络拓扑为典型分簇结构, 符合绝大多数 WSN 应用场景; 2) 为了提高整个网络的能量效率, 模型中新加入节点的优先连接概率取决于网络中已有簇头节点的剩余能量值与连接度; 3) 为解决因节点度过大而导致能量过快耗尽的问题, 模型中引入饱和度约束, 对节点度大小进行限制; 4) 考虑 WSN 真实部署情形, 引入优胜劣汰机制, 实现节点和链路的动态加入与退出。论文利用平均场理论分析该模型的度分布规律并给出解析公式, 仿真实验研究该模型的相关统计特性。针对室外环境下 WSN 经常面临的随机失效情形, 验证所提演化模型的容错性能。

2 拓扑演化模型

WSN 作为能耗敏感的分布式网络, 在多数情形下, 为延长整个网络生命周期, 通常采用分簇结构,

利用多跳通信实现数据的中继传输。同时, WSN 的拓扑演化具有明显的动态性特征, 具体表现为: 1) 新节点和新链路的加入; 2) 节点能量耗尽或环境原因造成的节点与链路失效等。因此, 在本文所提分簇演化模型中, 将传感器节点分为普通节点与簇头节点。普通节点新加入网络时, 将作为簇内成员节点与单一固定簇头节点建立通信, 而簇头节点可与其他簇头节点建立链路, 利用多跳方式实现簇内消息发送与簇外消息转发。其次, 新节点加入网络时, 以簇头节点能量值与连接度作为建立新连接时的判断依据, 即剩余能量与连接度越多的节点被选择互连的可能性越大。为限制簇头节点拥有过多连边, 约定任何一个簇头节点 i 可能拥有的最大连接数不超过饱和度约束 k_{\max} 。最后, 考虑传感器节点在真实环境下的失效情形, 网络拓扑中已存在的节点依据剩余能量的大小确定从网络中剔除的概率, 即剩余能量越小的节点, 其失效概率越高。具体演化规则如下。

1) 初始化: 开始给定 m_0 个簇头节点与 e_0 条边。为保证网络中不出现孤立节点, 各个簇头节点至少存在一条边与其他簇头节点相连。

2) 择优增长连接: 在每个时间步增加一个新节点, 则该节点成为簇头节点的概率为 p , 然后依照特定概率分布赋予能量值, 并连接到 1 个在其局域世界 Ω 已存在的簇头节点上。局域世界 Ω 是由已存在簇头节点中随机选取的 M 个节点构成。新加入节点与已存在簇头节点建立链路时, 依照择优概率 $\prod(k_i)$ 进行选择, 择优概率 $\prod(k_i)$ 取决于被选择簇头节点的度数 k_i 及其能量值 E_i 。为方便表述, 定义能量函数 $f(E)$ 表示节点能量与被选中连接的关系。该节点能量越充足, 则与新加入节点建立连接的可能性就越大。这种方式有助于整个网络能耗均衡。因此, 设定 $f(E)$ 为单调递增函数, 形式一般如 $E^{1/2}$ 、 E 和 E^2 。网络建设者可根据网络能耗要求, 适当调节 $f(E)$ 。新加入节点与已存在簇头节点 i 相连的概率 $\prod(k_i)$ 服从以下规则

$$\prod(k_i) = (1 - \frac{k_i}{k_{\max}}) \frac{f(E_i)k_i}{\sum_{j \in \Omega} f(E_j)k_j} \quad (2)$$

显然, 若当前簇头节点度数 k_i 满足饱和度约束 k_{\max} , 则 $1 - \frac{k_i}{k_{\max}} = 0$, 依照所定义规则, 该节点被选择连

接概率 $\prod(k_i) = 0$ 。

3) 反择优删除节点: 在每个时间步内, 以概率

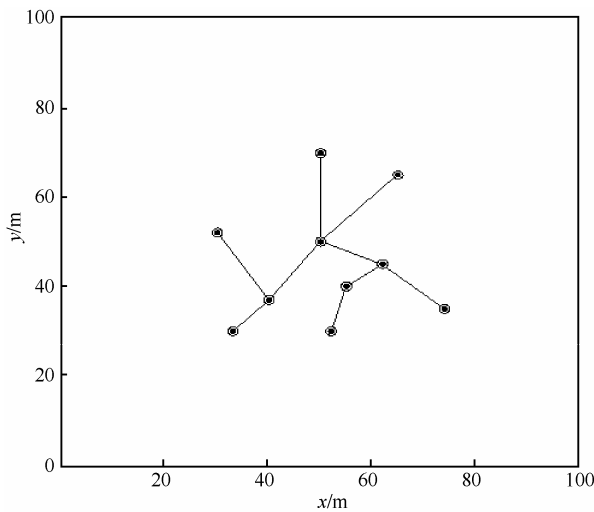
q 选择网络中某一个节点进行删除，并且与之相连的所有连接均被删除。被删除节点 i 依照反择优概率 $\prod^*(k_i)$ 进行选择，即节点能量越小，被选择删除链路的可能性就越大。

$$\prod^*(k_i) = \frac{f(E_{\max})k_{\max} - f(E_i)k_i}{\sum_{j=1}^{S(t)} (f(E_{\max})k_{\max} - f(E_j)k_j)} \quad (3)$$

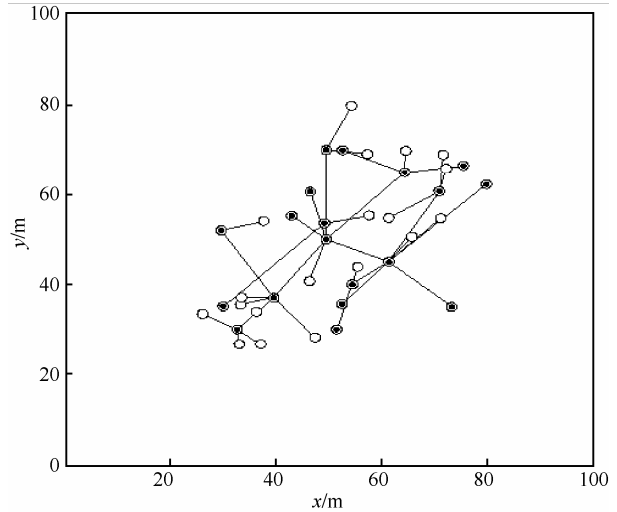
其中， E_{\max} 为节点所能拥有能量上限， $S(t)$ 为时刻 t 网络中节点数量。依照反择优概率删除节点与在 WSN 中普遍存在因节点能耗失效所产生的网络动态变化相互吻合。考虑网络中可能因为节点删除导致出现度数为 0 的孤立节点。因此，认定若网络中存在节点度数为 0，则该节点将从网络中永久性删除。

因此，按照上述规则经过一定时间演化，可得时刻 t 网络拥有节点总数 $S(t) = m_0 + (1-q)t$ ，簇头节点数量 $N(t) = m_0 + p(1-q)t$ 。显然，当 $t \rightarrow \infty$ 时， $S(t) \approx (1-q)t$ ， $N(t) \approx p(1-q)t$ 。

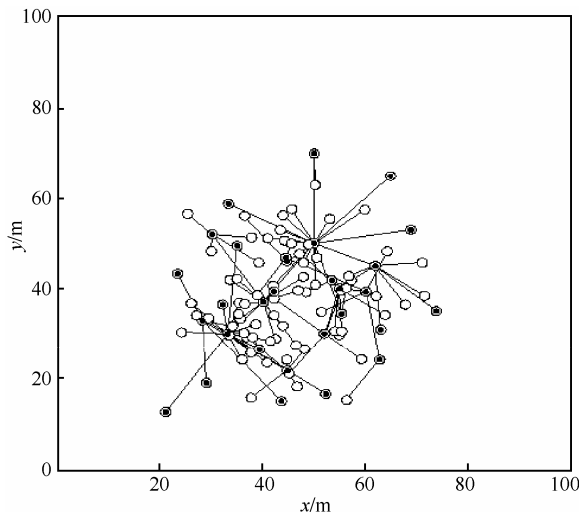
图 1 所示为依照所述网络演化机制生成的网络拓扑。如图 1(a)所示，在二维平面，依初始化设定条件，随机布设 10 个簇头节点，在 $t=0$ 时刻，网络节点平均度 $\langle k \rangle = 1.8$ ，且网络度分布相对不均。多数簇头节点度数为 1，而处于网络中心位置节点度数为 4，为后期择优增长连接提供了良好支撑。图 1(b)为依照参数设定 $p=0.2$ 、 $M=5$ 、 $q=0.1$ 、 $k_{\max}=10$ 时，向网络新加入 40 个节点后的网络拓扑生长情形。在 $t=40$ 时刻，网络节点平均度 $\langle k \rangle = 2.2$ ，网络中 80% 的节点度数为 1，而 10%



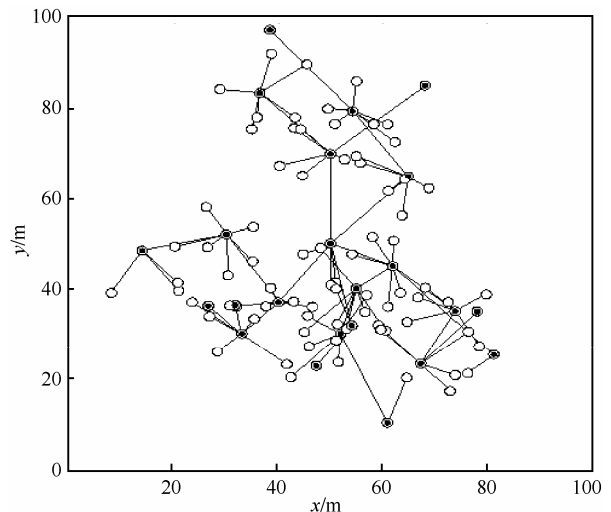
(a) 网络初始拓扑($m_0=10, e_0=8$)



(b) 新加入 40 个节点后网络拓扑($p=0.2, M=5, q=0.1, k_{\max}=10$)



(c) 新加入 90 个节点后网络拓扑($p=0.2, M=5, q=0.1, k_{\max}=\infty$)



(d) 新加入 90 个节点后网络拓扑($p=0.2, M=5, q=0.1, k_{\max}=10$)

图 1 网络生长机制演化示意

的关键节点的度数为 8，网络度分布不均进一步加剧。但值得注意的是，此时网络中节点最高度数仍低于 k_{\max} ，则饱和度约束 k_{\max} 不起作用。为进一步验证 k_{\max} 对网络拓扑生长的影响，图 1(c) 为依据原有设定，在未考虑 k_{\max} 时，向网络添加 90 个节点后的网络拓扑演化情形，而图 1(d) 为考虑 $k_{\max}=10$ 时的网络拓扑演化情形。如图 1(c) 所示，当 $t=90$ 时，网络节点平均度 $\langle k \rangle=2.4$ ，节点中心化程度明显上升。3% 的关键节点度数最大可达 24。因此，随着网络规模扩大，网络中“赢者通吃”现象将普遍存在，从而使网络新加入节点加入关键簇头节点的概率趋近于 1，而多数边缘节点连接概率趋近于 0，从而使网络呈现出明显的星形拓扑特征，并进而导致关键节点因过度通信，而导致能量快速耗尽。如图 1(d) 所示，在 $t=90$ 时刻，网络平均度 $\langle k \rangle=1.9$ ，网络中心化程度较图 1(c) 明显改善。有多达 12% 的节点度数满足饱和度约束 k_{\max} ，从而在保证网络无标度特征的同时，有效改善网络负载均衡。

3 数值分析

目前对 B-A 与 L-W 无标度网络度分布理论的研究方法主要包括平均场理论、主方程法和概率方程法等。本文采用平均场理论计算网络度分布。

情形 1 $M=1$

当局域世界 Ω 的节点数量 M 被设置为 1，新加入节点选择已存在簇头节点的连接概率等价于从全局网络已存在簇头节点中随机选择一个并进行连接。此时，择优生长机制失效。则在 t 时刻，节点 i 的连接度 $k_i(t)$ 满足如下动力学方程

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \left(1 - \frac{k_i}{k_{\max}}\right) \frac{1}{m_0 + pt} - q \sum_{i \in \Omega^*} \prod^*(k_i) \quad (4)$$

其中， Ω^* 为节点 i 单跳范围内邻居节点集合，则 $q \sum_{i \in \Omega^*} \prod^*(k_i)$ 为邻居节点被选择删除的概率。与文献

[8] 求解过程类似，对式(4)进行求解。考虑篇幅限制，略去具体求解过程，可得节点度服从指数分布

$$P(k) \propto \exp\left(-\frac{P}{1-q}k\right) \quad (t \rightarrow \infty) \quad (5)$$

情形 2 $M=N(t)$

当局域世界 Ω 的节点数量 M 被设置为当前全局网络中存在簇头节点数量 $N(t)$ ，则新加入节点选择在全局网络范围内依照概率 $\prod(k_i)$ 选

取已存在簇头节点进行连接。 $k_i(t)$ 满足如下动力学方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_i}{\partial t} &= \left(1 - \frac{k_i}{k_{\max}}\right) \frac{pM}{N(t)} \prod(k_i) - q \sum_{i \in \Omega^*} \prod^*(k_i) \\ &= \left(1 - \frac{k_i}{k_{\max}}\right) p \frac{f(E_i)k_i}{\sum_{j \in \Omega} f(E_j)k_j} - q \frac{\sum_{i \in \Omega^*} [G - f(E_i)k_i]}{\sum_{j=1}^{S(t)} [G - f(E_j)k_j]} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $G=f(E_{\max})k_{\max}$ 。由于 E_{\max} 与 k_{\max} 均为网络初始配置参数，则可知 G 为预设常数。式(6)中第 1 项表达了新加入节点因择优连接而增加的链路，第 2 项表达了反择优删除而减少的链路。由生成机制可知，所生成网络度分布具有明显异质性，即少数节点占有网络中绝大多数连接，而多数节点为度数为 1 的边缘节点。因此，在保证网络具有足够规模前提下，易得 $1 - \frac{k_i}{k_{\max}} \approx 1$ 。

假定 WSN 经过较长时间演化，对于由 M 个节点所组成的局域世界内节点集合 Ω ，则有

$$\sum_{j \in \Omega} f(E_j)k_j \approx M \langle k \rangle f(\bar{E}) \quad (7)$$

其中， $\langle k \rangle$ 表示网络中节点的平均度， \bar{E} 为网络中节点能量期望。同理，对于邻居节点集合 Ω^* 与全局网络 $S(t)$ ，可得

$$\sum_{i \in \Omega^*} [G - f(E_i)k_i] \approx \langle c \rangle [G - \langle k \rangle f(\bar{E})] \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{S(t)} [G - f(E_j)k_j] \approx [m_0 + (1-q)t][G - \langle k \rangle f(\bar{E})] \quad (9)$$

其中， $\langle c \rangle$ 为节点 i 所拥有邻居节点的数量期望。将式(8)~式(10)代入式(6)，易得

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{p}{M} \frac{f(E_i)k_i}{\langle k \rangle f(\bar{E})} - \frac{q \langle c \rangle}{m_0 + (1-q)t} \quad (10)$$

根据情形 2 设定： $M=N(t)$ ，则式(10)可被改写为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{p}{N(t)} \frac{f(E_i)k_i}{\langle k \rangle f(\bar{E})} - \frac{q \langle c \rangle}{m_0 + (1-q)t} \quad (11)$$

情形 3 $1 < M < N(t)$

当局域世界 Ω 的节点数量 M 被设置为局部网络范围，则 $k_i(t)$ 满足如下动力学方程

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{pM}{N(t)} \prod(k_i) - q \sum_{i \in \Omega^*} \prod^*(k_i)$$

$$= \frac{pM}{N(t)} \left(1 - \frac{k_i}{k_{i,\max}}\right) \frac{f(E_i)k_i}{\sum_{j \in \Omega} f(E_j)k_j} - q \frac{\sum_{i \in \Omega} [G - f(E_i)k_i]}{\sum_{j=1}^{S(t)} [G - f(E_j)k_j]} \quad (12)$$

同理，仅考虑网络长时间演化情形，将式(7)~式(9)代入式(12)，易得

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} \approx \frac{p}{N(t)} \frac{f(E_i)k_i}{\langle k \rangle f(E)} - \frac{q \langle c \rangle}{m_0 + (1-q)t} \quad (13)$$

通过观察易得，式(11)与式(13)完全一致，因此，情形2与情形3可做归一化讨论。依照 Sarshar^[14]提供的方法，可得网络总边数 $E(t)$ 的动力学方程

$$\frac{dE(t)}{dt} = 1 - q \langle k \rangle \quad (14)$$

设 $D(t)$ 为时刻 t 时网络内节点的总度数，易得

$$E(t) = \frac{D(t)}{2} \quad (15)$$

$\langle k \rangle$ 为网络节点平均度，不难得到

$$\langle k \rangle = \frac{D(t)}{S(t)} \quad (16)$$

将式(15)、式(16)与 $S(t) \approx (1-q)t$ 代入式(14)可得

$$\frac{dD(t)}{dt} + 2q \frac{D(t)}{(1-q)t} = 2 \quad (17)$$

式(17)为一阶线性常微分方程，对其进行求解，可得

$$D(t) = \frac{2(1-q)}{1+q} t \quad (18)$$

将式(18)代入式(16)，可得

$$\langle k \rangle = \frac{D(t)}{S(t)} \approx \frac{2}{1+q} \quad (19)$$

考虑 $\langle c \rangle$ 为网络在时刻节点单跳范围内所拥有邻居节点的数量期望，易得

$$\langle c \rangle = \frac{S(t)}{N(t)} \approx \frac{(1-q)t}{p(1-q)t} = \frac{1}{p} \quad (20)$$

将式(19)和式(20)代入式(13)，可得

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} \approx \frac{f(E_i)}{f(E)} \frac{(1+q)k_i}{2(1-q)t} - \frac{q}{tp(1-q)} \quad (21)$$

分别定义 $A = \frac{1+q}{2(1-q)}$ 与 $B = \frac{q}{p(1-q)}$ ，则式(21)

可被改写为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = A \frac{f(E_i)k_i}{f(E)t} - \frac{B}{t} \quad (22)$$

进一步对式(22)做等价变换，可得

$$\frac{\partial k_i}{A \frac{f(E_i)}{f(E)} k_i - B} = \frac{\partial t}{t} \quad (23)$$

由网络生成规则可知，对于每个节点 i 有初始度 $k_i(t_i) = 1 - q \langle k \rangle$ ，作为式(23)初始条件，对其进行求解，可得

$$k_i(t) = \left(1 - q \langle k \rangle - \frac{B}{Q}\right) \left(\frac{t}{t_i}\right)^Q + \frac{B}{Q} \quad (24)$$

其中， $Q = \frac{Af(E_i)}{E}$ 。利用(24)可得 $k_i(t) < k$ 的概率为

$$P[k_i(t) < k] = P \left\{ t_i > t \left[\frac{k - \frac{B}{Q}}{1 - q \langle k \rangle - \frac{B}{Q}} \right]^{\frac{1}{Q}} \right\} = 1 - P \left\{ t_i \leq t \left[\frac{k - \frac{B}{Q}}{1 - q \langle k \rangle - \frac{B}{Q}} \right]^{\frac{1}{Q}} \right\} \quad (25)$$

一般假设等时间间隔向网络中添加节点。因此， t_i 具有等概率密度 $P(t_i) = \frac{1}{m_0 + t}$ 。则式(25)可

被改写为

$$P[k_i(t) < k] = 1 - \frac{t}{m_0 + t} \left[\frac{k - \frac{B}{Q}}{1 - q \langle k \rangle - \frac{B}{Q}} \right]^{\frac{1}{Q}} \quad (26)$$

对式(26)求导，可得节点 i 度分布为

$$P(k) = \frac{\partial P[k_i(t) < k]}{\partial k} = \frac{t}{Q(m_0 + t)(1 - q \langle k \rangle - \frac{B}{Q})} \left[\frac{k - \frac{B}{Q}}{1 - q \langle k \rangle - \frac{B}{Q}} \right]^{\frac{1}{Q}-1} \quad (27)$$

考虑网络能耗属性，网络度分布 $P(k)$ 可进一步化为

$$P(k) = \int_0^{E_{\max}} \frac{t}{Q(m_0 + t)(1 - q\langle k \rangle - \frac{B}{Q})} \left(\frac{k - \frac{B}{Q}}{1 - q\langle k \rangle - \frac{B}{Q}} \right)^{\frac{1}{Q-1}} \rho(E) dE \quad (28)$$

其中, $\rho(E)$ 为整个网络节点能量的概率密度分布, E_{\max} 为节点能量值上限。由幂律分布一般形式 $P(k) \sim k^{-\gamma}$ 可以看出, 网络度分布 $P(k)$ 符合幂律分布特征, 且幂律指数 $\gamma = 1 + \frac{1}{Q}$ 。 $P(k)$ 与局域世界规模 M 、 $\rho(E)$ 、节点能量上限 E_{\max} 、簇头比例 p 、删除概率 q 、能量分布函数 $f(E)$ 均有密切关联, 但与网络节点规模并无关联, 因此具有明显的无标度特征。

4 仿真结果与讨论

在仿真实验中, 假设传感器节点随机部署在二

维平面区域, 网络中节点初始能量服从真实 WSN 中常见的正态分布 $N(2,1)$ 。初始拓扑如图 1(a)所示。其他仿真参数选取如下: 节点能量函数 $f(E)=E$, 网络经历 490 个时间步, 节点总数达到 $S(t)=500$ 。

4.1 度分布及其演化

4.1.1 不同参数对网络度分布影响

为评估不同参数对演化模型影响, 分别选取不同簇头比例 $p=0.1、0.2、0.4、0.6$, 饱和度约束 $k_{\max}=20、40、100、\infty$, 局域世界规模 $M=1、5、10、\infty$, 移除节点比例 $q=0.01、0.05、0.1、0.15$ 。所有数据均为至少 50 次独立运行的平均值。

图 2(a)为不同簇头比例 p 设定下的网络度分布 $P(k)$ 的变化情形。网络的稳态度分布 $P(k)$ 在不同簇头比例 p 设定下的差异并不明显, 但网络拓扑均具有明显无标度特性。与数值分析结果类似。随着簇头比例 p 的上升, 节点度分布曲线的截距明显缩短, 从而使网络在度数较小的范围内较早出现峰值, 保证网络链路稀疏分布。

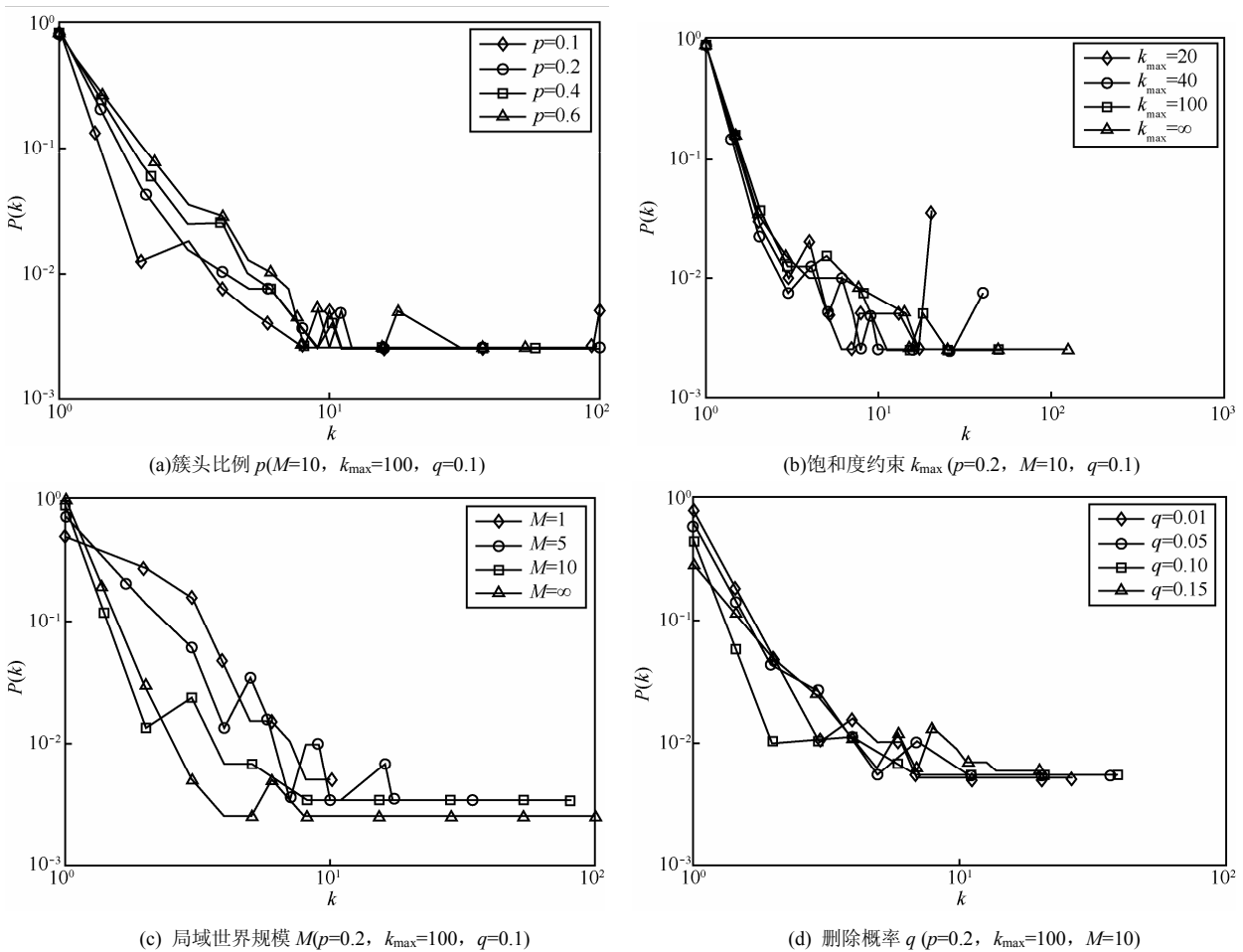


图 2 不同参数设置下网络度分布 $P(k)$ 变化情况

图 2(b)给出分簇拓扑演化模型的度分布与最大度限定值 k_{max} 之间关系。演化模型中的节点度 $P(k)$ 分布具有明显的无标度特性。而且，随着 k_{max} 的增长，节点度分布中的重尾现象也随之明显增强。因此，通过对节点的最大连接度进行限制能够降低网络的非均质程度，改善网络能耗负载，有利于延长网络的系统生命周期。

图 2(c)给出不同局域世界规模 M 的网络度分布情形。当局域世界的规模 M 从 1 扩大到网络全局范围，网络度分布表现出明显差异。当 $M=1$ 时，网络度分布曲线表现为明显的马头型形状，具备典型的指数分布特征，符合数值分析结果。随着 M 的增长，度分布曲线由指数型曲线渐渐被拉直成为一条幂尾型曲线，无标度特征逐渐凸显。当局域世界规模 M 扩大到全局网络规模时，网络演化具有明显的无标度特征。显然，局域世界规模 M 的选取与网络是否能够具备无标度特征具有密切关联。

图 2(d)为不同删除概率 q 的网络度分布情形。与图 2(a)类似，不同删除概率 q 的度分布曲线均具备明显的无标度特征，且彼此间趋势类似。但随着 q 的增加，度数较低的节点在网络中所占比例明显下降。这是由于删除概率 q 的升高将导致网络簇头总数依次递减，而新加入普通节点总数不变，从而使单个簇头节点有较高概率获得更多的链路。

4.1.2 不同网络模型度分布

为进一步验证所提网络演化模型与现有模型之间差异，分别选取 B-A 模型、L-W 模型、文献[9,10]所提 WSN 演化模型进行对比分析。所生成 5 种网络节点规模均为 500。为保证生成网络拓扑节点平均度 $\langle k \rangle$ 一致，设定每单位时间步内新增节点与链路数量均为 1。具体参数如表 2 所示。

如图 3 所示，不同网络演化模型之间的度分布均表现出明显的无标度特征，但仍具有明显的差异性。B-A 模型由于在全局范围内选取高度数节点与新增节点建立连接，使网络拓扑的度分布异质性明显高于其他 4 种模型。但由于节点度分布不受饱和度和约束，从而将造成度数较高的中心节点因承担过多通信负载而导致能量快速耗尽。与 B-A 模型相比，L-W 模型与文献[10]所提模型在保证网络无标度特征的同时，节点所拥有最高度数明显下降。但从能耗均衡角度，仍难以满足网络实际需求。本文所述模型与文献[9]所提模型由于考虑饱和度约束，网络度分布曲线呈现出明显的翘尾特征，即网络中

达到饱和度和约束上限的节点比例明显上升。但不难发现，文献[9]所提模型的度分布曲线存在明显波动，从而造成各个簇头节点所负责簇内成员节点数量存在明显差异，使簇头节点能耗分布不均，从而可能引发“能量空洞 (energy hole) [15]”。与文献[9]所提模型相比，本文所提模型由于“优胜劣汰”机制的存在，使节点多数集中于度分布两端，即一端为度数为 1 的末端边缘节点，另一端为满足饱和度和约束的中心簇头节点，从而使所生成单元簇规模大致相等，可有效均衡网络能耗。

表 2 参数设置

无标度网络模型	参数说明	参数
B-A	新增连接数	$m=1$
L-W	局域世界规模	$M=5$
文献[9]	能量函数	$f(E)=E$
	节点初始能量分布	$N(2,1)$
	簇头比例	$p=0.2$
	饱和度约束	$k_{max}=40$
文献[10]	能量函数	$f(E)=E$
	节点初始能量分布	$N(2,1)$
	删除链路概率	$q=0.1$
本文模型	能量函数	$f(E)=E$
	节点初始能量分布	$N(2,1)$
	簇头比例	$p=0.2$
	删除链路概率	$q=0.1$
	饱和度约束	$k_{max}=40$

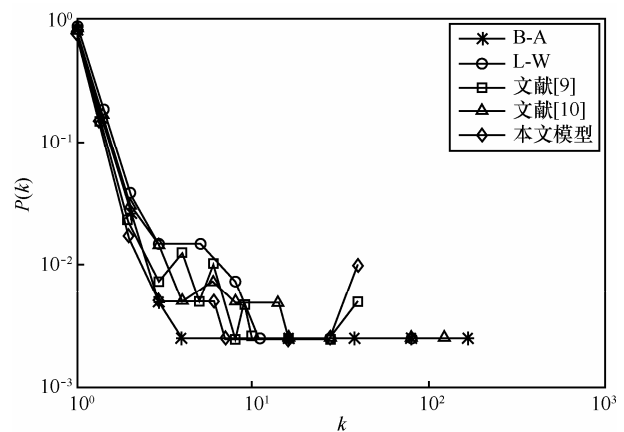


图 3 不同网络模型度分布比较

4.2 容错性能分析

4.2.1 网络容错性能评价指标

容错能力的高低是 WSN 能否持续有效提供服务的关键。因此，本节通过评估随机攻击策略下网

络的最大连通分支覆盖率验证所提网络演化模型的容错性能。

定义图 $G=(V, E)$ 表示 WSN 拓扑, 其中 V 是节点集, $|V|$ 为集合 V 节点的数目. E 为边集, 且图中的边均为无向边. 如果一个子图 $G'=(V', E')$, $V' \subseteq V$, 且 V' 中任意 2 个节点间均至少有一条链路存在, 则称 G' 为 G 的连通子图. 如果图 $G=(V, E)$ 由 ω 个连通子图构成, 分别记为 $G_1=(V_1, E_1), G_2=(V_2, E_2), \dots, G_\omega=(V_\omega, E_\omega)$, 则称 $G_1, G_2, \dots, G_\omega$ 称为图 G 的 ω 个连通分支. 若 $V' \in \{V_1, V_2, \dots, V_\omega\}$ 且

$$|V'| = \max\{|V_1|, |V_2|, \dots, |V_\omega|\} \quad (29)$$

则称 $G'=(V', E')$ 为图 G 的最大连通分支^[1], 记

$$C = \frac{|V'|}{|V|} \quad (30)$$

为 G' 对 G 的覆盖率. 参照文献[16]对可用连接的统计方法, 认为分割后的 WSN 中仅最大连通分支可用, 因此采用最大连通分支覆盖率来度量拓扑的可用性. 显然, 若网络因发生节点失效而导致拓扑分割, 则可合理认定网络性能降低, 此时最

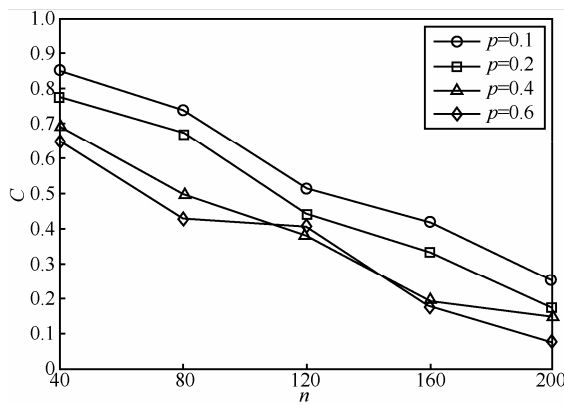
大连通分支的覆盖率也随之降低. 且随着网络中失效节点的增多, 最大连通分支覆盖率单调递减. 因此, 最大连通分支覆盖率 C 能够准确刻画 WSN 的容错性能.

4.2.2 不同参数对网络容错性能影响

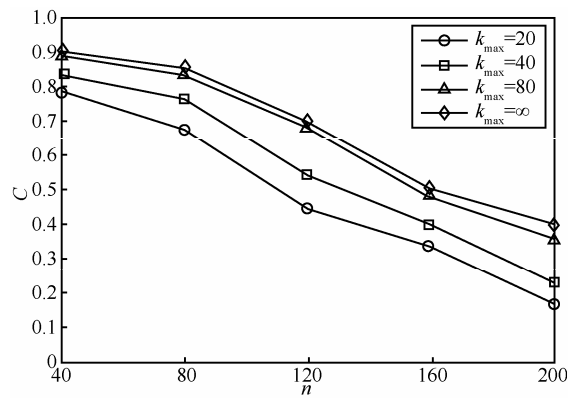
为评估所提演化模型中不同参数对网络容错性能影响, 分别选取不同簇头比例 $p=0.1, 0.2, 0.4, 0.6$, 饱和度约束 $k_{\max}=20, 40, 100, \infty$, 局域世界规模 $M=1, 5, 10, \infty$, 移除节点比例 $q=0.01, 0.05, 0.1, 0.15$.

如图 4(a)所示, 随着移除节点数量的增多, 网络最大连通分支覆盖率 C 逐步递减, 且分簇概率 p 的上升将导致网络容错性能的下降. 当 $p=0.1$ 时, 若从网络中随机移除 200 个节点, 则 $C=0.297$. 当 $p=0.6$ 时, $C=0.089$, 仅为前者的 30%. 显然, 根据度分布结果, 分簇概率 p 的上升, 将使网络中簇头节点数量增多, 导致网络中簇头节点随机失效概率的升高, 并进而造成网络容错性能的下降.

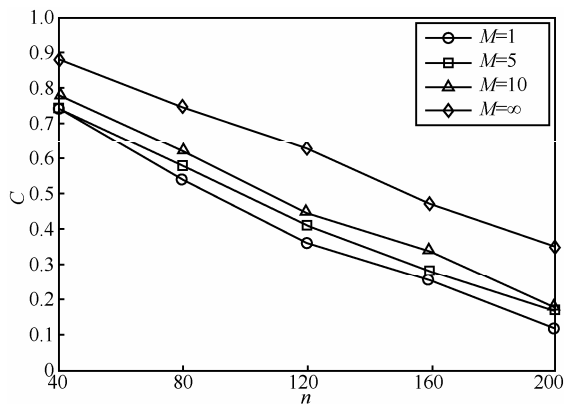
如 4(b)所示, 与分簇概率 p 对网络容错性能的影响相反, 饱和度约束 k_{\max} 与网络容错性能呈正相



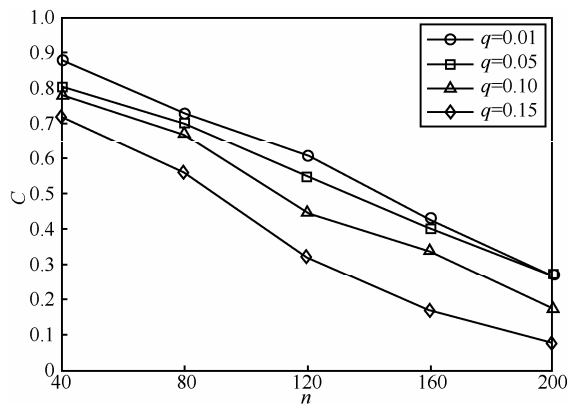
(a) 簇头比例 $p(M=10, k_{\max}=100, q=0.1)$



(b) 饱和度约束 $k_{\max}(p=0.2, M=10, q=0.1)$



(c) 局域世界规模 $M(p=0.2, k_{\max}=100, q=0.1)$



(d) 删除概率 $q(p=0.2, k_{\max}=100, M=10)$

图 4 不同参数设置下随机移除节点数量 n 与网络最大连通分支覆盖率 C 的对应关系

关。根据度分布结果, 当 k_{\max} 较低时, 网络中满足 k_{\max} 上限的簇头节点比例较高, 使此类高度数簇头节点有较高概率受到随机攻击。当 k_{\max} 上升时, 尽管将会导致少数高度值簇头节点的度值继续升高, 但也将促使达到 k_{\max} 上限的簇头节点在网络中所占比例下降, 从而降低此类高度数簇头节点被随机攻击的概率, 进而提升网络的容错性能。但值得注意的是, 当 k_{\max} 达到网络节点总数的 25% 时, 它与无约束时的容错性能曲线相似, 这是因为 k_{\max} 的上升将导致它对网络拓扑约束力的下降。

如图 4(c) 所示, 随着局域世界规模 M 的上升, 网络容错性能也随之得到改善。根据度分布结果, 局域世界 M 是构建网络无标度特征的关键属性。随着 M 的上升, 网络拓扑也将完成由指数分布网络向无标度网络的过渡。与 k_{\max} 对网络度分布作用效果类似, 当 $M=\infty$ 时, 新加入节点在全局网络范围内依据择优原则选择簇头节点进行连接, 则此时高度数簇头节点对新加入节点吸附能力最强。从而使少数高度值簇头节点有较高概率保持度值继续增长, 但此时高度值簇头节点在网络中所占比例极低。随着 M 下降, 则可供新加入节点选择连接的簇头节点范围也将逐渐缩小, 从而使簇头节点间度分布趋向均匀, 度数较高的簇头节点所占比例上升, 受随机攻击概率增加, 造成网络容错性能下降。

如图 4(d) 所示, 删除概率 q 与网络容错性能呈负相关。不难理解, 删除概率 q 的增加将导致网络中可用簇头数量的减少, 伴随而来的是单个簇头的度数期望的上升, 从而加剧随机失效对网络拓扑带来的冲击。

通过观察, 簇头比例 p 和删除比例 q 与网络容错性能成负相关。相反, 局域世界规模 M 与饱和度约束 k_{\max} 呈正相关。因此, 为保证网络具有良好容错性, 需合理控制网络内簇头规模及尽可能降低因能量耗尽等所带来的删除概率 q , 并提升局域世界规模 M 与饱和度约束 k_{\max} 。但值得注意的是, 考虑在室外环境下网络全局信息获取困难, 以及过高度约束 k_{\max} 所带来的能耗均衡问题, 如何采取均衡策略构建网络生长策略将是未来研究的重要方向。

4.2.3 不同网络模型容错性能比较

为验证不同模型之间容错性能差异, 仍选取 B-A 模型、L-W 模型、文献[9]与文献[10]所提 WSN 演化模型进行对比分析, 具体参数设置与表 2 一致。

如图 5 所示, 随着移除节点数量的增多, 5 种网络模型所生成拓扑的最大连通分支覆盖率逐步

递减, 但彼此间差异并不明显。其中, B-A 模型容错性能最优。但正如前文所述, B-A 模型与真实 WSN 情形差异明显, 且未考虑能耗均衡, 因此拓扑可用性不佳。本文所述模型容错性能仅次于 B-A 模型, 但在网络演化过程中引入 WSN 分簇特征, 并且考虑能耗均衡, 因此所生成拓扑在保证具有较强容错性能的同时, 具备较强的适用性。

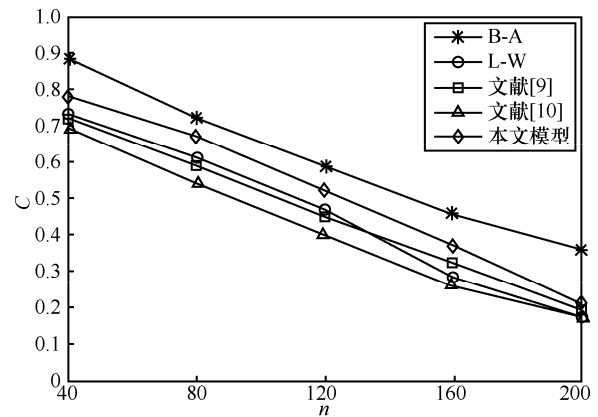


图5 不同网络模型容错性能比较

5 结束语

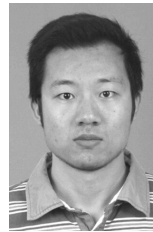
复杂网络理论为研究 WSN 的容错性提供了新的思路。本文针对节点失效导致网络性能下降的问题, 提出了一种新的分簇拓扑演化模型。该模型以传感器节点剩余能量与度连接作为新加入节点选择建立连接的依据, 并引入度约束对节点度进行限制。理论与仿真结果证明, 首先, 该演化模型生成网络具有明显无标度特性, 因此能够获取较好的容错性能。其次, 采用分簇结构生成网络, 与 WSN 真实应用情形更为贴近。最后, 模型可动态平衡网络能耗, 延长网络生存周期。论文还针对室外环境下 WSN 所经常面临的随机失效情形, 讨论了所提演化模型容错性能。研究表明扩大局域世界规模与提升饱和度约束上限可有效提升网络容错性能。与之相反, 簇头比例与节点删除概率的上升将导致网络容错性能的下降, 从而为后续构建容错较优 WSN 提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 王良民, 马建峰, 王超. 无线传感器网络拓扑的容错度与容侵度[J]. 电子学报, 2006, 34(8): 1446-1451.
WANG L M, MA J F, WANG C. Degree of fault-tolerance and intrusion-tolerance for topologies of wireless sensor networks[J]. Chinese

- Journal of Electronics, 2006, 34(8): 1446-1451.
- [2] 肖伟, 徐明, 吕品, 等. 无线传感器网络事件簇的数据聚集容错机制[J]. 通信学报, 2010, 31(6): 112-118.
XIAO W, XU M, LV P, *et al.* Fault tolerant scheme for data aggregation in event cluster over wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2010, 31(6): 112-118.
- [3] 曾勇, 马建峰. 基于位置的无线传感器网络可靠性区分服务机制[J]. 通信学报, 2008, 29(2): 71-78.
ZENG Y, MA J F. Location based reliability differentiation service for WSN [J]. Journal on Communications, 2008, 29(2): 71-78.
- [4] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [5] LI X, CHEN G. A local-world evolving network model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 328(1): 274-286.
- [6] ZHU H, LUO H, PENG H, *et al.* Complex networks-based energy-efficient evolution model for wireless sensor networks [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 41(4): 1828-1835.
- [7] 张德干, 戴文博, 牛庆肖. 基于局域世界的 WSN 拓扑加权演化模型[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1000-1004.
ZHANG D G, DAI W B, NIU Q X. Local-world weighted topology evolving model for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 41(4): 1828-1835.
- [8] 刘浩然, 韩涛, 李雅倩, 等. 具有路径能耗优化特性的 WSN 无标度容错拓扑控制算法[J]. 通信学报, 2014, 35(6): 64-72.
LIU H R, HAN T, LI Y Q, *et al.* Scale-free fault-tolerant topology control algorithm in wireless sensor network with optimization of path energy consumption[J]. Journal on Communications, 2014, 35(6): 64-72.
- [9] LI S, LI L, YANG Y. A local-world heterogeneous model of wireless sensor networks with node and link diversity[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011, 390(6): 1182-1191.
- [10] 罗小娟, 虞慧群. 基于能量感知的无线传感器网络拓扑演化[J]. 传感技术学报, 2010, 23(12): 1798-1802.
LUO X J, YU H Q. Topology evolution based on energy-aware in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(12): 1798-1802.
- [11] 姜楠, 周日贵, 郑洪源, 等. 无线传感器网络中的局域世界演化模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(2): 230-233.
JIANG N, ZHOU R G, ZHENG H Y, *et al.* Local-world evolving model of wireless sensor networks[J]. Journal of University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(2): 230-233.
- [12] 陈力军, 刘明, 陈道蓄, 等. 基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化[J]. 计算机学报, 2009, 32(1): 69-76.
CHEN L J, LIU M, CHEN D X, *et al.* Topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads by random walkers[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(1): 69-76.
- [13] 王亚奇, 杨晓元. 一种无线传感器网络簇间拓扑演化模型及其免疫研究[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 6-14.
WANG Y Q, YANG X Y. Study on a model of topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads and its immunization[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 6-14.
- [14] SARSHAR N, ROYCHOWDHURY V. Scale-free and stable structures in complex ad hoc networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 026101.
- [15] 刘安丰, 任炬, 徐娟, 等. 异构传感器网络能量空洞分析与避免研究[J]. 软件学报, 23(9): 2438-2448.
LIU A F, REN J, XU J, *et al.* Analysis and avoidance of energy hole problem in heterogeneous wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 23(9): 2438-2448.
- [16] SANTI P. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks[J]. ACM Computing Surveys, 2005, 37(2): 164-194.

作者简介:



符修文 (1987-), 男, 河南洛阳人, 武汉理工大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络抗毁性技术、机会网络。



李文锋 [通信作者] (1966-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 武汉理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网、无线传感器网络、机器人技术。E-mail: liwf@whut.edu.cn。