

# 能耗均衡的无线传感器网络无标度容错拓扑模型

刘浩然<sup>1),3)</sup> 孙雅静<sup>2)</sup> 刘彬<sup>2),3)</sup> 韩丽<sup>1)</sup> 尹荣荣<sup>1),3)</sup>

<sup>1)</sup>(燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

<sup>2)</sup>(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

<sup>3)</sup>(燕山大学河北省特种光纤与光纤传感重点实验室 秦皇岛 066004)

**摘 要** 网络生命期是衡量无线传感器网络性能的重要指标,无标度拓扑对节点随机失效的强容错性在一定程度上能够延长网络生命期,但其拓扑结构的不均匀会造成网络能耗的不均衡.为此,针对无标度拓扑能耗不均衡导致网络生命期缩短的问题,该文考虑节点剩余能量和节点间距离,建立能耗模型,根据此模型评估网络的生命期,分析节点能量和节点间距离对网络生命期的影响,得出网络生命期与节点能量正相关,与节点间距离负相关的关系.将此关系应用于无标度拓扑演化规则的择优连接机制中,提出一种能够均衡网络能耗的无线传感器网络容错拓扑动态演化模型.在建模过程中,将节点剩余能量与节点间距离的比值作为适应度函数,并考虑网络拓扑变化时存在的链路增减的动态行为,利用平均场理论分析此演化模型节点度分布的幂率特性,最终得到一个具有无标度特性的容错拓扑.在 MATLAB 仿真平台下,分析由所提演化模型形成拓扑的度分布形式,验证出该拓扑的度分布服从幂率特性.同时,将此模型与其他经典模型进行网络性能对比分析,验证出该模型不仅能够均衡节点和网络的能量消耗,延长网络的生命期,还能够增强网络的容错和容侵能力.

**关键词** 无线传感器网络;能耗均衡;网络生命期;无标度拓扑;适应度函数;物联网;信息物理融合系统

**中图法分类号** TP393 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2017.01843

## Energy Consumption Balanced Scale-free Fault-Tolerant Topology Model for Wireless Sensor Networks

LIU Hao-Ran<sup>1),3)</sup> SUN Ya-Jing<sup>2)</sup> LIU Bin<sup>2),3)</sup> HAN Li<sup>1)</sup> YIN Rong-Rong<sup>1),3)</sup>

<sup>1)</sup>(School of information science and engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

<sup>2)</sup>(School of electrical engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

<sup>3)</sup>(The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

**Abstract** Network lifetime is an important indicator to evaluate the performance of wireless sensor networks. The fault tolerance of scale-free topology is beneficial to prolong the network lifetime, but the uneven construct will lead the imbalanced energy consumption, then the imbalanced energy consumption will shorten network lifetime. In order to solve the problem, a network energy consumption model is established based on the residual energy of node and the distance between nodes, and the network lifetime is evaluated according to this model. The influence of node energy and node distance on network lifetime is analyzed. We found that node energy is positively related to network lifetime, and the node distance is negatively related to network lifetime. Then the influencing relationship is introduced into the preferential connection mechanism of scale-free

收稿日期:2015-11-20;在线出版日期:2016-03-24. 本课题得到河北省自然科学基金(F2015203091, F2014203239)、河北省科技计划项目(15275423)和秦皇岛市科学技术研究与发展规划项目(201502A216)资助. 刘浩然,男,1980年生,博士,教授,主要研究方向为无线传感器网络拓扑建模、工业故障检测等. E-mail: liu.haoran@ysu.edu.cn. 孙雅静(通信作者),女,1991年生,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络容错拓扑控制和故障诊断. E-mail: s\_sunyajing@163.com. 刘彬,男,1953年生,博士,教授,主要研究领域为轧机扭转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. 韩丽,女,1986年生,博士,副教授,主要研究方向为复杂网络建模和无线传感器网络容错技术. 尹荣荣,女,1985年生,博士,主要研究方向为无线传感器网络平台搭建和容错拓扑结构的构建.

topology, a dynamic evolution model which can balance the energy consumption and tolerant node failure is proposed in this paper. In the model, the ratio of distance between the nodes to residual energy of the nodes is regarded as fitness function, the addition of new links and reduction of some old links are also introduced into this model, and the power-law distribution characteristic of node degree in this evolution model is analyzed by the mean field theory. Thus a topology which has scale-free and fault-tolerant properties is obtained. To verify the correctness of the theoretical analysis and analyze the network performance, extensive simulation experiments are carried out in the MATLAB simulation platform. Compared with other classical models, the simulation results show that the degree distribution of the topology obeys the power-law distribution characteristic, and it can not only balance the energy consumption of nodes and network, prolong the network lifetime, but also enhance the capacity of fault tolerance and intrusion tolerance.

**Keywords** wireless sensor networks; balanced energy consumption; network lifetime; scale-free topology; fitness function; Internet of Things; Cyber-Physical System

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由大量静止或移动的微型传感器节点以自组织和多跳的方式构成的分布式无线传感网络,其目的是协作地感知、采集、处理和传输网络覆盖地理区域内被感知对象的信息,并把这些信息通过传输到 Sink 节点(基站)和网络、卫星最终发送给需要监测网络的观察者<sup>[1]</sup>. 图 1 所示为一个典型的 WSNs 结构.

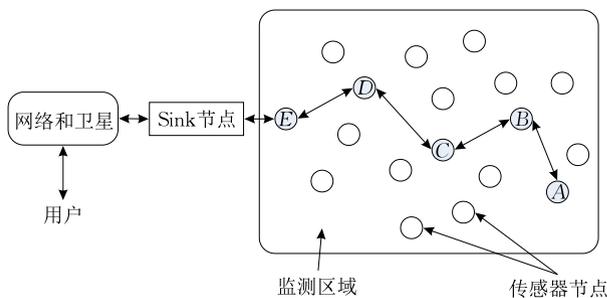


图 1 典型的 WSNs 结构

WSNs 是一类特别意义上的移动/无线计算系统,网络节点集成有传感模块和通信模块,与提供网络的互联、互通和互操作的无线通信网络不同,WSNs 主要是以数据的采集和处理为中心<sup>[2]</sup>. 由于 WSNs 具有自组织、部署迅速便捷和强隐蔽性等技术优势,因此十分适合使用在战场目标定位<sup>[3]</sup>、生理数据收集<sup>[4]</sup>、智能交通系统<sup>[5]</sup>和海洋探测<sup>[6]</sup>等众多领域. WSNs 组网灵活,但是其自身也存在一定的局限性,传感器节点的能量由电池供给,更换困难,节

点能耗的不均衡会导致其能量过快耗尽,引起节点失效;且节点通常被布置在无人看管的恶劣环境下,容易因为遭受环境损毁和恶意攻击而造成节点失效,从而降低网络的连通覆盖率,降低应用网络的正确性和可靠性,导致网络生命期短,无法正常工作<sup>[7]</sup>. 因此,为了保证网络的高可靠性和高健壮性,使之能够在网络出现节点失效的时候继续提供正确高效的服务,研究如何增强网络的容错性,均衡网络能耗,延长网络的生命期是目前 WSNs 实际应用中面临的重要问题<sup>[8]</sup>.

容错技术研究的内容之一是设计具有强容错能力的拓扑结构,目前针对容错拓扑的研究主要有使用最少中继节点并保证节点和基站之间的连通来提高网络抗毁性<sup>[9]</sup>、构造  $k$  连通图来容忍  $k-1$  个节点的失效<sup>[10]</sup>、增加备用节点数量替代失效节点<sup>[11]</sup>和对网络进行分簇等<sup>[12]</sup>,前三者均是通过增加网络中的冗余节点来增强网络的容错性,但是会给网络带来额外的能量开销,分簇结构虽然能够减少网络能耗,但是某一个簇头节点的失效会导致部分网络失去功能,与所要求的强容错性还有一定的距离.

近年来,借助于复杂网络研究拓扑容错性的方法成为热点. 复杂网络是具有复杂拓扑结构和动力学行为的大规模网络,它是由大量的节点通过边的相互连接而构成的图,现实世界中许多系统都可以用复杂网络来描述,如协作网、电力网、Internet 及生物网络中的食物链网等<sup>[13]</sup>. 复杂网络中的无标度网络(scale-free network)是指节点度服从幂率分布( $p(k) \sim Ck^{-\gamma}$ )的网络,通常把节点度服从幂率分布的特性称为无标度特性. 随着学者对复杂网络这一

新兴学科研究的不断深入,以及大量的实验结果表明,许多现实世界的复杂网络是无标度的,即节点度服从幂率分布.典型的无标度网络结构如图 2 所示,从图中可以看出,无标度网络的连接分布极不均匀,网络中大量节点拥有少量的连接,如 1、2 号节点等只有一条连边,而少量节点却拥有网络的大多数连接<sup>[14]</sup>,如 3、4 号节点等.

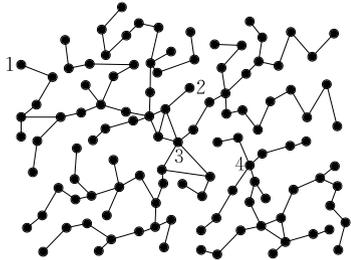


图 2 无标度网络结构

无标度网络与随机网络和小世界网络有着不同,其主要表现在无标度网络对于节点的随机失效的鲁棒性和对恶意攻击的脆弱性,这种特性源于众多网络的共同点,即增长与择优连接机制<sup>[15]</sup>.而为了使 WSNs 能够长时间正常工作,要求网络在面对节点失效时具有强容错性,来延长网络的生命期.因此,近年来,根据复杂网络与 WSNs 之间的联系,将无标度特性引入到 WSNs 中成为一个研究热点,有学者提出通过构建具有无标度特性的无线传感器网络拓扑的途径,来容忍 WSNs 中传感器节点的频繁失效<sup>[16]</sup>.但是,无标度拓扑中大节点能量消耗速度较快,容易造成节点间能耗不均衡,进而造成度大节点加快失效,影响网络性能.因此,构造能够均衡网络能耗的无标度容错拓扑对优化网络性能具有重要意义.

## 2 相关工作

为了构建更有效的无标度容错拓扑,均衡网络能耗,达到延长网络生命期的目的,需要对已有的研究成果进行深入的理解和学习.目前关于利用无标度机制构建容错拓扑的研究已经有了一定进展,其主要研究内容为拓扑演化模型的构建,比较经典的 BA 无标度模型(Barabási-Albert model)为复杂网络建模提供了思路<sup>[17]</sup>,利用网络的增长和择优连接机制形成一个无标度网络模型.基于 BA 模型,众多研究人员在构建无标度网络模型上经过扩展和改进均取得了丰富的研究成果,改进的模型使演化生成的网络越来越符合网络的需求<sup>[18]</sup>,如在文献[19]中

Chen 等人提出的 B 模型中,增加节点、增加链路和链路删除机制符合实际网络的规模随时间变化的特性.然而,无标度拓扑虽然对复杂网络具有较强的容错性,但将其应用于能量受限的 WSNs 时,应结合网络自身特点改进无标度机制.

在复杂网络无标度拓扑形成机制研究的基础上,针对 WSNs 节点能量受限的特点,基于适应度演化模型,Wang 等人<sup>[20]</sup>将适应度的计算与节点的当前能量值结合在一起综合考虑,得到能量高效利用、容错的拓扑结构.文献[21]提出了一种节能容错的 EAEM 模型(Energy-Aware Evolution Model),该模型以节点的剩余能量和节点度作为适应度函数,形成的拓扑在一定程度上达到了节能的目的,促使了网络向节能的方向转变.针对 WSNs 节点通信范围受限的问题,文献[22]以节点当前剩余能量值和当前节点度同时作为节点局域范围内择优连接的判断依据,构建了一种具有无标度特性的局域世界演化模型,降低了模型设计的复杂度,提高了拓扑的容错能力.文献[23]在局域世界内构建无标度网络,择优连接概率取决于节点剩余能量、通信流量和连接距离,在增强网络容错性的同时降低了节点发生相继故障的概率.文献[24]在构建拓扑过程中,综合考虑了节点的剩余能量和节点最大度限制,使得生成的拓扑具有良好的容错性,均衡了网络能耗.文献[25]利用随机行走机制,构建了一个簇间拓扑演化模型,以簇头节点当前能量值作为建立连接时的判断依据,有效减少了节点因能量耗尽而失效的比例.Wang 等人在文献[26]中采用簇头节点随机游走策略,并在择优连接时考虑节点当前能量及其连接度来构建拓扑,均衡了簇头节点的能量,使网络寿命得以延长.文献[27]将节点的剩余能量和节点的负载结合起来,作为节点的适应度函数,给出了具有容错特性的拓扑生成模型(FTEL 模型),在一定程度上延长了网络的生命期.在研究 WSNs 网络规模随时间的非线性变化时,文献[28]通过按照幂函数分布来增加链路的方法,设计了一个非线性演化的能量均衡 WSNs 无标度拓扑结构.Zheng 等人在文献[29]中考虑在链路删除的假设上增加节点删除机制,有利于构建均衡能耗的拓扑结构.文献[30]研究了拓扑中节点及其链路同时删除的影响,能够演化出符合 WSNs 中节点退化、链路失效和断开等特征的能量均衡无标度拓扑.但是上述的研究在容错和能耗均衡之间的权衡还有待改进,且在构建拓扑过程中对于节点间数据传输距离对网络能耗及生命期

的影响考虑较少,而节点间数据传输距离与能耗有着密切关系,距离越大,则能耗越大,进而影响网络的生命期。

针对上述问题,为了更有效地容忍节点失效和均衡网络能耗,保证网络的高可靠性和高健壮性,延长网络的生命期,本文首先建立网络能耗模型,依据此模型来评估网络的生命期,分析网络生命期与节点剩余能量、节点间距离的影响关系。接下来,基于此关系,采用具有适应度机制的无标度拓扑演化策略,并在拓扑演化过程中引入链路删除机制,使模型演化符合 WSNs 动态变化的特点。最终,基于节点度、剩余能量和节点间距离的综合考虑与链路删除机制的引入,提出一种能耗均衡的 WSNs 无标度容错拓扑演化模型(Based on the Distance and Dynamic Behavior, BDDB)。通过在 MATLAB 平台下进行仿真实验,验证出由此模型生成的拓扑具有无标度特性,且能够有效均衡网络能耗,延长网络的生命期。

### 3 能耗模型及生命期评估方法

WSNs 通常将网络中最早失效的传感器节点的生存时间定义为网络的生命期<sup>[31]</sup>,其对于网络的工作性能具有重要意义。网络的生命期与网络能耗密切相关,因此,本节通过建立能耗模型,根据此模型评估网络生命期,确定其与节点剩余能量和节点间距离的关系,为之后将此关系应用于无标度择优连接概率奠定了基础。

由于网络中节点感知和融合数据所需能量主要依赖于节点的硬件设施,且远小于节点传输和接收数据而消耗的能量。因此,本文考虑传感器节点数据传输和接收所消耗的能量来构建能量模型。下面给出本文所采用的无线通信射频模型<sup>[32]</sup>及有关参数描述。

发送方传输  $k$ bit 数据到距离  $d$  的接收方所需要的能量如式(1)所示

$$E(k, d) = E_{\text{elec}}k + k\epsilon d^{\sigma} \quad (1)$$

接收方接收到  $k$ bit 数据所消耗的能量如式(2)所示

$$E(k) = E_{\text{elec}}k \quad (2)$$

其中: $E_{\text{elec}}$ 为发送电路或接收电路每处理 1 bit 数据所消耗的能量,单位是 nJ/bit; $\epsilon d^{\sigma}$ 表示不同信道模型下放大器的功耗; $d$ 为节点间的数据传输距离; $\sigma$ 为通信路径损耗指数,且  $\sigma$  为大于 0 的常数。

从式(1)和(2)可以看出,发送器传输  $k$ bit 数据

的能量消耗大于接收器接收  $k$ bit 的能量消耗,多出的这部分能量是由于放大器放大信号引起的,由式(1)可知,放大器放大信号的能耗是由参数  $\epsilon$ 、节点间距离  $d$  和路径损耗指数  $\sigma$  决定的,而  $\epsilon$  和  $\sigma$  取决于  $d$  的大小。当两个节点之间的距离  $d$  小于如式(3)所示的距离门限  $d_0$  时, $\sigma=2, \epsilon=\epsilon_{fs}$ ;而当  $d$  大于  $d_0$  时, $\sigma=4, \epsilon=\epsilon_{\text{amp}}$ 。由此可知,放大器的功耗取决于节点间的传输距离  $d$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{\text{amp}}}} \quad (3)$$

其中: $\epsilon_{fs}$ 表示自由能量衰减模型功率放大系数; $\epsilon_{\text{amp}}$ 为多路径衰减信道模型的功率放大系数。

网络中的单个节点在每一轮(节点发送和接收数据的时间)所消耗的能量如式(4)所示

$$\begin{aligned} E_{\text{cos}} &= 2E_{\text{elec}}k + k\epsilon d^{\sigma} \\ &= \begin{cases} 2E_{\text{elec}}k + k\epsilon_{fs}d^2, & \sigma = 2 \\ 2E_{\text{elec}}k + k\epsilon_{\text{amp}}d^4, & \sigma = 4 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

则网络的总能耗如式(5)所示

$$E_{\text{costotal}} = \sum_{i=1}^N 2E_{\text{elec}}k + k\epsilon d_i^{\sigma} \quad (5)$$

其中: $N$ 为拓扑中节点个数; $d_i$ 表示节点  $i$  与下一跳节点间的距离。由式(5)可以看出,当  $E_{\text{elec}}$  和  $k$  已知时,能耗仅与数据传输距离  $d_i$  有关,确定了  $d_i$ , 可得  $\epsilon$  和  $\sigma$ , 则可得网络能耗大小。

网络中节点  $i$  的能耗评估值可定义为节点  $i$  的能耗与其剩余能量的比值,如式(6)所示

$$E_s(i) = \frac{E_{\text{cos}}}{E_{\text{re}}(i)} = \frac{2E_{\text{elec}}k + k\epsilon d_i^{\sigma}}{E_{\text{re}}(i)} \quad (6)$$

其中: $E_{\text{re}}(i)$ 代表节点剩余能量。式(6)即为所建立的节点能耗模型,在其基础上建立网络能耗模型,如式(7)所示

$$E_s = \frac{E_{\text{costotal}}}{E_{\text{re}}} \quad (7)$$

其中, $\overline{E_{\text{re}}}$ 为网络节点平均剩余能量,且  $\overline{E_{\text{re}}} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{\text{re}}(i)}{N}$ 。

结合式(6)和(7)对网络生命期进行评估,分析可知,网络的生命期 LIFE 可表示为式(8)

$$\begin{aligned} LIFE &= \frac{1}{E_s} = \frac{\overline{E_{\text{re}}}}{E_{\text{costotal}}} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^N E_{\text{re}}(i) / N}{\sum_{i=1}^N 2E_{\text{elec}}k + k\epsilon d_i^{\sigma}} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)即为对网络生命期进行评估的方法,可以

看出,在构建拓扑时,节点  $i$  与其下一跳节点间距离和节点的平均剩余能量决定了网络的生命期长短,节点间数据传输距离越大,节点平均剩余能量越小,网络的生命期越短;节点间数据传输距离越小,节点平均剩余能量越大,则网络的生命期越长。

WSNs 的生命期是网络监测任务成败与否的关键,只有在保证了网络生命期的前提下,才能够有效地进行数据的收集和处理。而构建容错性和能耗均衡双重优化的拓扑结构,其最终目的也是为了延长网络的生命期。因此,基于本节给出的网络生命期评估方法中的参数关系,提出一个能有效延长网络生命期的 WSNs 拓扑演化模型。

## 4 无标度拓扑演化模型

本节首先简要介绍已有的无标度拓扑生成模型,其次,利用无标度拓扑的强容错性,在已有研究的基础上,考虑节点剩余能量和节点间距离,改进择优连接概率,并引入链路删除机制,最终构建出均衡能耗的无标度容错拓扑。由于所研究的拓扑不依赖于严格的控制中心,各节点具有均等的转发和接收数据的机会,分布式处理采集的信息。因此,所得拓扑具有分布式的快速组网、高效传输、低开销等优点。

增长 (Growth) 和择优连接 (Preferential Attachment) 是无标度拓扑形成的必要条件, B、EAEM、FTEL 模型均是基于增长和择优连接机制,通过优化拓扑生成规则来提升网络性能。B 模型<sup>[19]</sup>中新节点与节点  $i$  相连的概率  $\pi(k_i)$  取决于节点  $i$  的度  $k_i$ ,  $\pi(k_i)$  如式(9)所示,并考虑了拓扑形成过程中链路增减的动态行为,形成拓扑的度分布服从幂率分布,且幂率指数  $2 < \gamma \leq 3$ 。

$$\pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (9)$$

其中,  $\sum_j k_j$  为已存在节点的度总和。

EAEM<sup>[21]</sup>是在经典无标度模型的基础上,结合 WSNs 自身特点提出的节能模型,满足无标度拓扑形成的两个必要条件:增长和择优连接,式(10)为此模型的择优连接概率。

$$\pi(E, k_i) = \frac{f(E)k_i}{\sum_{j \in \text{local-area}} f(E_j)k_j} \quad (10)$$

其中:  $f(E)$  为增函数,形式可以为  $E, E^2, \sqrt{E}, \ln E$  等; localarea 为节点  $i$  邻节点区域。此演化机制能够

形成一个幂率指数  $\gamma=1$  的无标度拓扑,为构建节能容错的 WSNs 无标度拓扑结构提供了新思路。

FTEL<sup>[27]</sup>模型借鉴了 EAEM 的思想,将节点剩余能量引入无标度模型,同时又考虑到节点生命期与节点负载的关系,对择优连接概率进行改进,如式(11)所示。此模型的幂率指数  $\gamma = -(1-\alpha)$ , FTEL 演化机制形成了幂指数可调的拓扑结构。

$$\pi(E, k_i) = \frac{\eta_i k_i}{\sum_{j \in \text{local-area}} \eta_j k_j} \quad (11)$$

其中:  $\eta_i$  为适应度函数,且  $\eta_i = E_{re}(i)/k_i^\alpha$ ;  $E_{re}(i)$  为节点  $i$  的剩余能量;  $k_i^\alpha$  为节点  $i$  的负载大小。

虽然无标度结构具有良好的容错性,但其度大节点能量消耗速度快、无法平衡节点间的能量消耗,而 WSNs 生命期不仅与单个节点的能耗有关,还与整个网络的节点能耗均衡性密切相关。以上 3 种模型虽考虑到不同方面构建了容错的无标度拓扑结构,但是对于无标度拓扑能耗问题的研究较少,导致其与有效均衡网络能耗、延长网络生命期的目标还有一定差距。

为了在保持无标度拓扑容错性的同时,增强其能耗均衡性,延长网络生命期,达到网络性能优化的期望效果,在已有研究的基础上,提出一种能够均衡网络能耗的无标度容错拓扑演化模型——BDDB 模型。上述 B 模型虽考虑了实际网络中链路增减的动态行为,但在择优连接时节点度的单一选择,使得 WSNs 中度大节点连接较多节点,能耗速度快,易造成能量空洞,且过多的链路增加将使节点能量加快耗尽,导致其过早失效; EAEM 模型虽考虑到择优概率与节点剩余能量密切相关,但忽略了链路动态特性和节点间距离与能耗的关系; FTEL 模型适应度函数中的负载只是有关节点度的物理负载,同样忽略了节点间距离和实际网络链路的失效行为。而不同于 B、EAEM 和 FTEL 模型, BDDB 在基于无标度拓扑的形成条件下,设置择优连接概率时综合考虑节点度、剩余能量和节点间距离,并在拓扑构建过程中引入链路删除机制。鉴于本文构建低能耗拓扑的初衷,不考虑旧节点间链路的增加,因为会造成网络的冗余,增加节点能耗。BDDB 模型的拓扑演化规则如下。

(1) 初始网络。初始网络由  $m_0$  个节点组成。

(2) 增长机制。与 B 模型类似,每个时间步加入新节点,带有从此节点出发的  $m$  条边,并连接到已存在的节点上,且  $0 < m \leq m_0$ 。

(3) 择优连接. 新加入的节点与网络中已存在的节点  $i$  相连的概率  $\pi(E, d, k_i)$  与节点  $i$  的剩余能量  $E_{re}(i)$ 、节点度  $k_i$  和节点间距离  $d_i$  相关, 如式(12)所示

$$\pi(E, d, k_i) = \frac{F \cdot k_i}{\sum_j F_j \cdot k_j} \quad (12)$$

其中适应度函数  $F$  如式(13)所示

$$F = \frac{E_{re}(i)}{d_i} \quad (13)$$

其中,  $d_i$  表示节点间的距离, 这里特别表示新加入节点与已存在节点  $i$  的距离.

剩余能量  $E_{re}(i)$  如式(14)所示

$$E_{re}(i) = E_0 - \mu k_i \quad (14)$$

其中:  $E_0$  表示节点初始能量;  $\mu$  为节点剩余能量关于节点度的参数因子. 节点消耗的能量与节点度密切相关, 度大的节点接收和转发数据量大, 能量消耗大, 因此可用式(14)建立节点剩余能量和节点度的关系.

由式(13)中的节点剩余能量和节点间距离可知, 式(12)给出的择优概率与上一节网络生命期评估方法中的参数关系密切相关. 节点偏好与高能、传输距离短的节点进行连接, 从而达到节能、均能, 延长网络生命期的目的.

(4) 链路删除机制. 在每个时间步加入新节点的同时, 对网络中已存在的  $b$  条链路进行删除,  $0 \leq b < m$ . 以式(15)所示的反择优概率  $\pi^*(E, d, k_i)$  选择节点  $i$ , 并选择其节点  $j$  且当节点  $j$  的度  $k_j \geq 2$  时, 删除节点  $i, j$  之间的链路, 重复这一步骤  $b$  次

$$\begin{aligned} \pi^*(E, d, k_i) &= \frac{[1 - \pi(E, d, k_i)]}{[N(t) - 1]} \\ &= \frac{\left[1 - \frac{E_{re}(i) \cdot k_i}{d_i \cdot \sum_j E_{re}(j) \cdot k_j / d_j}\right]}{[N(t) - 1]} \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $N(t)$  是  $t$  个时间步后形成网络的规模. 在经过  $t$  个时间步后, 将产生一个规模为  $N(t) = t + m_0$  个节点,  $(m-b)t$  条边的网络.

由式(15)可知, 拥有小能量、大传输距离的节点, 被选择删除链路的可能性较大. 以反择优概率删除链路与 WSNs 中链路失效的动态变化是吻合的. 以式(15)所示的反择优概率  $\pi^*(E, d, k_i)$  删除链路, 有利于降低网络中节点的能耗, 均衡网络能耗, 进而延长网络的生命期. 在 WSNs 中, 择优连接和反择优删除的方式有助于整个网络的能耗均衡<sup>[33]</sup>.

**算法 1.** BDDB 模型的拓扑演化算法.

输入: 初始网络节点个数  $m_0$ 、新节点所带边数  $m$ 、删除的链路  $b$ 、网络规模  $N$

输出: 网络拓扑图  $G(V, E)$

```

1. WHILE ( $i$  is unequal to  $N+1$ ) do
2.   deploy  $N$  nodes randomly
3. END WHILE
4. FOR ( $i$  from 1 to  $N$ ) do
5.   mark  $m_0$  nodes to form the initial network
6. END FOR
7. WHILE (unmarked nodes exist in the network) do
8.   FOR ( $i$  from 1 to  $N$ ) do
9.     store the unmarked neighbor nodes of the
       existing nodes in  $W[\ ]$ 
10.    FOR ( $j$  from 1 to  $W[num]$ ) do
11.      count the existed nodes which can be
        connected with  $W[num]$ , and put in  $A[\ ]$ 
12.    FOR ( $q$  from 1 to  $A[num]$ ) do
13.      calculate  $\pi_q$  by formula(12), chose the
        node has  $\max(\pi_q)$  join in the network
14.    END FOR
15.  END FOR
16.  calculate  $\pi_q^*$  by formula (15), the nodes are
    ordered and put in  $Q[\ ]$  according to the value
    of each node
17.  FOR ( $Link$  from 1 to  $b$ ) do
18.    IF (the neighbor node  $j$  of the top node in
        $Q[\ ]$  meet the conditions  $k_j \geq 2$  and  $\pi_j^*$  is the
       maximum among the neighbors) do
19.      delete ( $e_{ij}$ )
20.    END IF
21.  END FOR
22. END FOR
23. END WHILE

```

## 5 拓扑演化的动态特性分析

为了证明生成拓扑具有无标度特性, 对本文所提 BDDB 模型的动态特性进行分析, 主要内容为网络度分布<sup>[34]</sup>的形式, 度分布表示节点度的概率分布函数  $p(k)$ , 即网络中的节点有  $k$  条边的概率. 下面通过理论分析来讨论 BDDB 模型的度分布形式.

根据连续域理论,  $k_i(t)$  满足如下的动力学方程

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m\pi(E, d, k_i) - b \cdot \left[ \pi^*(E, d, k_i) + \sum_{j \neq i} \pi^*(E, d, k_j) \pi^*(E, d, k_i) \right] \quad (16)$$

假定网络经过较长时间步的演化获得较大的规模, 则  $N(t) - 1 = m_0 + t - 1 \approx t$ , 可得

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} \approx m\pi(E, d, k_i) - b \cdot$$

$$\left[ \frac{2(1 - \pi(E, d, k_i))}{t} - \frac{(1 - \pi(E, d, k_i))^2}{t^2} \right] \approx \frac{mFk_i}{2(m-b)t\bar{F}} - \frac{2b}{t} + \frac{bFk_i}{(m-b)t^2\bar{F}} \quad (17)$$

当  $t$  足够大时有

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} \approx \frac{mFk_i}{2(m-b)t\bar{F}} - \frac{2b}{t} \quad (18)$$

式中,  $\bar{F}$  表示网络中所有节点剩余能量的期望值与节点间距离的期望之比。

由于在大规模的网络中, 初始网络的  $m_0$  很小, 所以网络的平均节点度为

$$\langle k \rangle = \frac{2(m-b)t}{m_0+t} \approx 2(m-b) \quad (19)$$

则有

$$\sum_j F_j k_j = \bar{F} \langle k \rangle t \approx 2(m-b) \bar{F} t \quad (20)$$

进而可得

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} \approx \frac{m}{2(m-b)t} \cdot \frac{Fk_i}{\bar{F}} - \frac{2b}{t} \quad (21)$$

由于  $k_i(t) \propto t^\beta$ ,  $\beta < 1$ ; 并结合节点  $i$  的初始条件  $k_i(t_i) = m$  得到当  $t \rightarrow \infty$  时, 解上述所示的一阶线性偏微分方程, 因此得到方程式(21)的解为

$$k_i(t) = B \left( \frac{t}{t_i} \right)^\beta - B + m \quad (22)$$

其中, 动态参数为

$$\beta = \beta(m, b) = \frac{m}{2(m-b)} \frac{F}{\bar{F}} \quad (23)$$

系数为

$$B = B(m, b) = m - \frac{4b(m-b)}{m} \cdot \frac{\bar{F}}{F} \quad (24)$$

由式(22)可得  $k_i(t) < k$  的概率为

$$p(k_i(t) < k) = p\left(t_i > t \left( \frac{B}{k-m+B} \right)^{\frac{1}{\beta}}\right) \quad (25)$$

其中,  $0 < \left( \frac{B}{k-m+B} \right)^{\frac{1}{\beta}} < 1, k > m$ 。

假设在相同的时间间隔内向网络添加新节点,  $t_i$  服从均匀分布, 则其概率密度满足条件  $p(t_i) =$

$\frac{1}{m_0+t}$ , 所以代入式(25)得

$$p(k_i(t) < k) = 1 - \left( \frac{B}{k-m+B} \right)^{\frac{1}{\beta}} \frac{t}{m_0+t} \quad (26)$$

因此, 可知

$$\begin{aligned} p(k) &= \frac{\partial p(k_i(t) < k)}{\partial k} \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{t}{m_0+t} B^{\frac{1}{\beta}} (k-m+B)^{-(1+\frac{1}{\beta})} \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{t}{m_0+t} B^{\frac{1}{\beta}} (k-m+B)^{-\gamma} \end{aligned} \quad (27)$$

其中, 度分布指数为

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\beta} \quad (28)$$

式(27)即为 BDDB 模型产生拓扑的度分布形式, 式(28)为度分布指数。在特定时间步,  $\frac{1}{\beta} \frac{t}{m_0+t} B^{\frac{1}{\beta}}$  为一

常数, 因此, BDDB 模型演化拓扑的度分布服从幂率分布, 即  $p(k) \sim Ck^{-\gamma}$ , 幂率指数  $\gamma > 1$ 。上述的分析结果表明利用 BDDB 模型的演化规则能够形成无标度拓扑, 也说明此拓扑具有强容错性。

## 6 仿真与性能分析

在 MATLAB 仿真平台下, 分析 BDDB 模型产生拓扑的度分布形式, 并将此模型与第 4 节给出的 3 种经典拓扑生成模型进行对比仿真, 以验证所提模型的优越性。这 3 种模型分别为: 考虑网络链路增减变化行为的 B 模型, 选择高能节点进行择优连接的 EAEM 模型以及基于节点负载与网络生命期关系的 FTEL 模型。仿真实验主要分析 BDDB 模型与对比模型在能量均衡性、网络生存时间以及网络抗毁性等方面的性能优化程度, 仿真实验环境参数见表 1。在文献[35]中, 作者提出网络容侵能力与网络结构熵有关, 并利用网络结构熵与幂率指数  $\gamma$  之间的关系, 得到了无论在何种网络规模下, 使得网络结构熵最大时的幂率指数  $\gamma = 3.4$  这样的结论, 而本文所提的 BDDB 算法形成拓扑的幂率指数  $\gamma > 1$ , 可以

表 1 实验环境参数

| 参数  | 取值        |
|---|-----------|
| 节点个数 $N$  | 100       |
| 节点分布区域 $A/m^2$  | 200 × 200 |
| 节点最大传输半径 $R/m$  | 50        |
| 节点产生数据包 $L/\text{bit}$  | 100       |
| 数据融合能耗 $E_{\text{elec}}/(\text{nJ}/\text{bit})$                           | 50        |
| 放大器功放能耗 $\epsilon_{\text{amp}}/(\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2))$ | 100       |
| 节点初始能量 $E/J$  | 1         |
| 参数 $\sigma$   | 2         |
| 参数 $\mu$  | 0.1       |
| 网络初始节点数 $m_0$   | 4         |
| 新加入节点所带边数 $m$   | 4         |
| 删除的链路 $b$   | 2         |

调整  $\beta$ , 由于  $m, b$  已定,  $F/\bar{F}=0.417$  即可使得  $\gamma=3.4$ . 为了较好地研究不同算法的性能差异, 在 B、EAEM、FTEL 和 BDDB 算法运行之初规定相同的网络规模, 并假定网络中的节点均具有相同的初始能量, 数据结果均取 50 次实验的平均值.

### 6.1 BDDB 模型形成的网络度分布

第 5 节利用连续域理论分析了 BDDB 模型形成拓扑的度分布形式, 证明了其  $p(k)$  服从幂率分布  $p(k) \sim Ck^{-\gamma}$ , 即网络具有无标度特性. 本节在 MATLAB 仿真平台下, 对所提算法形成拓扑在度分布指数  $\gamma=3.4$  时的度分布形式进行仿真分析,  $N(t)=100$  时的网络度分布规律如图 3 所示.

从图 3 中可以看出, 本文所提 BDDB 演化模型的度分布服从幂率分布, 具有度大节点概率小, 度小节点概率大的特点, 满足无标度的网络特征, 这是因为 BDDB 模型的演化规则遵循了形成无标度拓扑的必要条件, 即增长和择优连接. 既然网络具有无标度特性, 也就表示其将对节点的随机失效具有较强的容忍能力. 仿真验证了利用 BDDB 模型能够产生无标度网络, 与理论分析结果具有一致性.

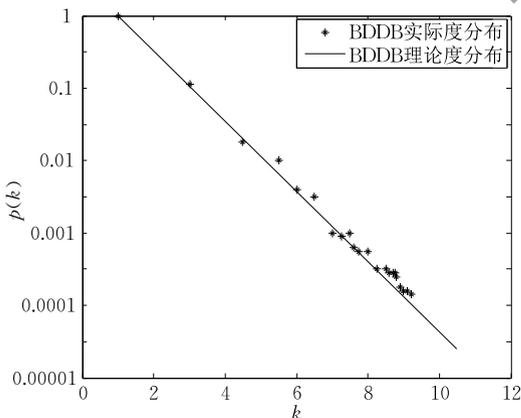


图 3 BDDB 模型度分布

### 6.2 节点能量均衡效果分析

节点能耗均衡与网络生命期密切相关, 在节点初始能量相同的条件下, 能耗均衡即节点剩余能量均衡, 均衡的能量能够减少某个节点因能量过早耗尽而失效的现象, 有效延长网络的生命期. 因此, 为了验证本文所提 BDDB 模型中节点能量的均衡性, 将其与 B、EAEM 和 FTEL 模型就能量均衡效果方面进行对比分析, 根据式(14)所示的剩余能量计算公式统计网络运行 30 轮不同模型中每个节点的剩余能量, 得到 B、EAEM、FTEL 和 BDDB 模型产生拓扑的节点剩余能量分布, 统计结果分别如图 4 中 (a)、(b)、(c)、(d) 所示.

通过图 4 中 4 幅子图 (a)、(b)、(c)、(d) 的比较可以看出, 由 BDDB 模型产生拓扑的节点剩余能量分布更均衡, 且具有较高的平均值, 这说明在相同的时间内, BDDB 模型的节点能量消耗较少且均匀, 能够有更多的能量均衡地用于网络正常运行. 从图 4 (a) 中可以看到, B 模型产生拓扑的节点平均剩余能量为 0.612 J, 划定平均值上下 0.05 J 的范围, 此时大量节点的剩余能量不均匀地分布在划定区域外, 能量均衡效果不理想, 这是由于 B 模型单一考虑节点度, 而忽略了节点能量在拓扑构建过程中的重要作用. 由图 4 (b) 可知, EAEM 模型节点平均剩余能量为 0.629 J, 同样划定上下 0.05 J 的范围, 与 B 模型类似, 也有大量节点的能量处于划定范围之外, 且存在超过 0.75 J 的少量节点, 能量分布缺乏均衡性. 这是因为 EAEM 模型虽考虑了节点能量, 有一定的节能性, 但与能耗有关的因素未能全面考虑, 导致其不利于网络中节点的能量均衡. 在图 4 (c) 中, FTEL 模型平均剩余能量为 0.595 J, 大量节点的能量均匀分布在上下 0.05 J 的划定范围内, 但是其平均水平较低. 这是由于 FTEL 虽考虑了节点负载对节点能耗的影响, 在一定程度上均衡了节点能量, 但与 EAEM 类似, 未能综合分析能耗相关的其他因素, 导致能量大幅度消耗, 不利于网络生命期的有效延长. 由图 4 (d) 可知, BDDB 模型产生的拓扑节点平均剩余能量的计算结果为 0.628 J, 平均水平较高, 且节点能量在平均值上下 0.05 J 的范围内均匀分布, 这是由于 BDDB 模型的择优概率中综合考虑了节点度、剩余能量和节点间距离, 它们均是与能耗相关的因素, 并且 BDDB 模型中链路删除机制的引入, 能够删除耗能大的链路, 有助于降低能耗值. 从图 4 中还可以看出 4 种模型中均有个别节点的剩余能量低于其划定范围的下界, 这是因为所构建的拓扑均具有无标度特性, 存在少数节点其度较大, 消耗的能量比其他节点多, 但无论从自身来看还是与其他模型进行对比分析, 均可看出由 BDDB 模型生成的拓扑在节能、均能方面具有显著优势, 能够达到有效均衡能耗的目的.

### 6.3 网络生存时间对比

由于 WSNs 中传感器节点的能量由电池供给, 且无法更换, 这就要求在构建拓扑时要最大限度的延长网络的生命期, 完成网络的既定任务<sup>[36]</sup>. 网络生命期常指网络系统从开始工作到网络不能再提供数据传输服务为止的时间, 本文定义网络的生命期为从网络维护更新阶段开始, 至网络出现首节点失

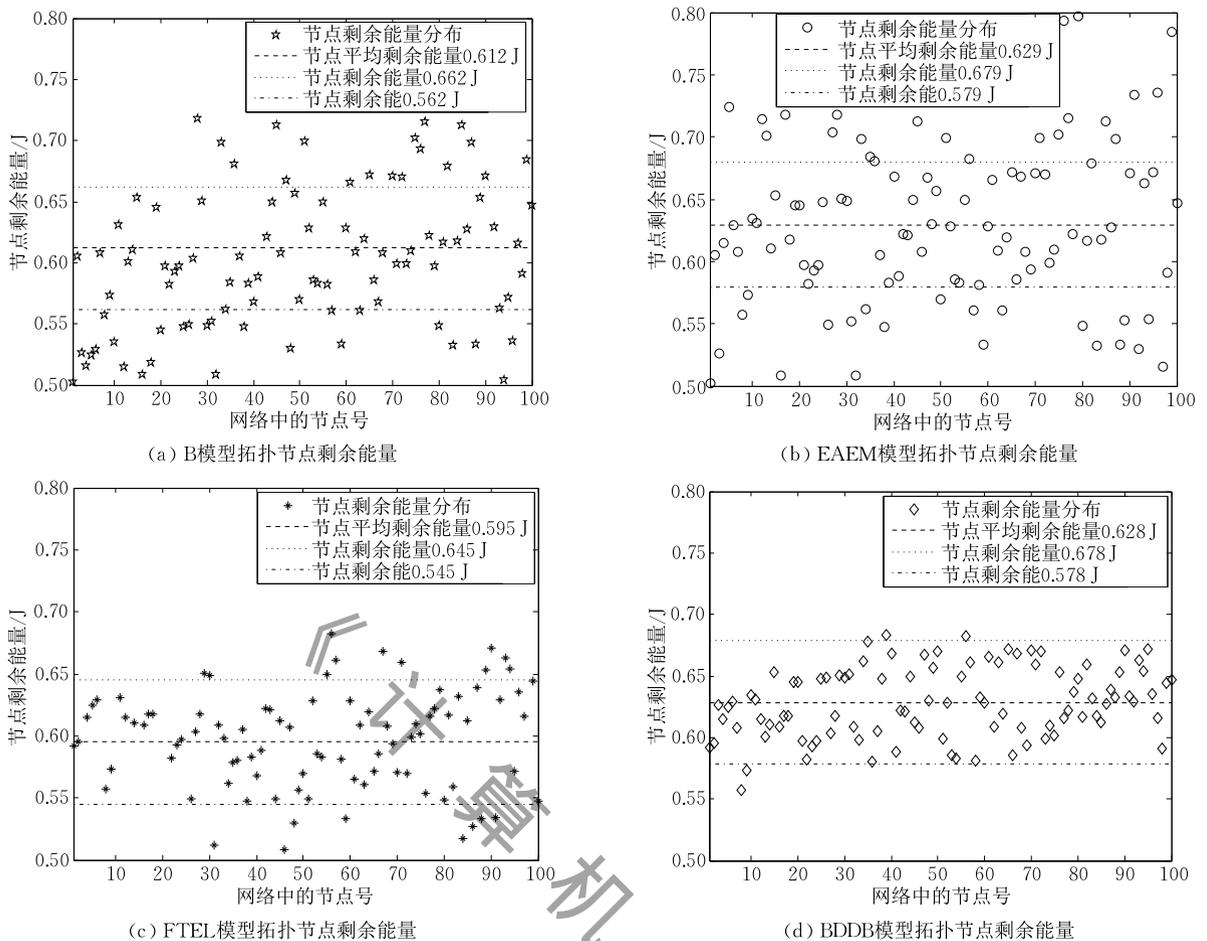


图4 网络节点剩余能量分布图

效的时间. 能量的消耗是影响网络生命期的重要因素, 采用无线通信射频能耗模型计算每轮能耗. 图5给出了B、EAEM、FTEL、BDDB共4种模型在不同失效节点比例下(首节点, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)网络生存时间的对比结果, 在每轮中各节点与其邻节点进行数据交换, 网络正常运行, 实验结果取50次实验的平均值.

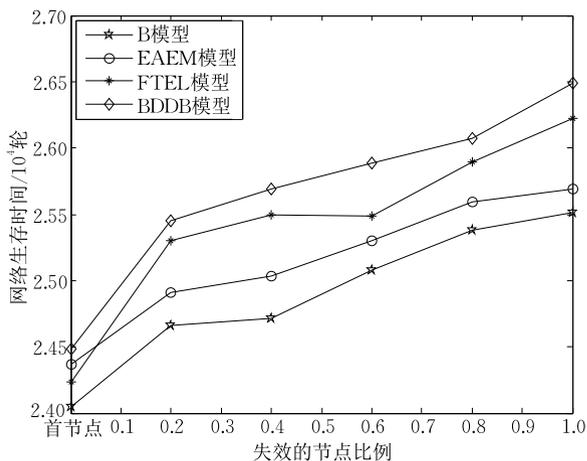


图5 网络生存时间对比图

在图5中, 横坐标表示随着网络的运行, 不断增大的失效节点比例, 纵坐标代表当达到不同节点失效比例时, 对应网络已经累计的生存时间. 可以看到, 首节点失效时, BDDB模型的网络生命期长于B、EAEM和FTEL模型. 由6.2节的仿真实验结果可知, BDDB模型的节点剩余能量分布均匀, 且平均水平较高, 因此与其他3种模型相比, 有更多的能量支持网络运行, 说明BDDB模型在延长网络生命期方面具有更强的优势. 随着失效节点比例的增大, BDDB模型的网络生存时间也均长于其他3种模型. 在60%的节点失效的情况下, BDDB模型累计的网络生存时间比FTEL模型多出400轮, 比EAEM模型多出600轮, 而比B模型多出800轮, 在网络全部节点失效时, BDDB模型累计的生存时间最长. 这是由于在拓扑构建过程中, 新节点加入网络时, 择优选择高能、距离短的已有节点进行连接; 删除链路时, 优先选择能量较少、传输距离较大的节点间链路进行删除, 由BDDB模型的拓扑演化规则形成的无标度网络不仅具有强容错性, 而且能有效地平衡节点的能量消耗, 延长网络的生存时间. 综合上述分析,

可知 BDDB 模型能够满足 WSNs 长生存时间的要求。

#### 6.4 容错性对比

构建无标度拓扑的主要原因在于其强容错性,为了分析不同算法下的网络对节点失效规模的容忍程度,衡量本文所提 BDDB 算法形成拓扑的容错性,将此模型与 B、EAEM、FTEL 模型进行对比仿真。在每轮中各节点与其邻节点进行数据交换,网络正常运行,并随机移除网内节点,统计移除节点后网络最大连通分支上的节点数。实验结果取 50 次实验的平均值,如图 6 所示。

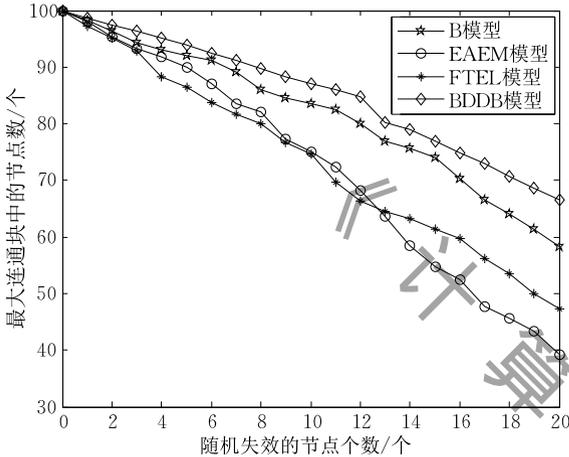


图 6 不同模型的容错能力对比图

从图 6 可以看出, B、EAEM、FTEL 和 BDDB 模型在面对节点随机失效时均表现出了一定的容错性,因为 4 种模型均是基于无标度的演化规则建立的,拓扑中度大节点的比例较小,而度小节点的比例较大,使得大比例的度小节点随机失效的概率较大,而度小节点的失效通常不会严重影响到网络的连通性。BDDB 模型相对于 B、EAEM 和 FTEL 模型来说,表现出了更强的容错性,在随机失效 20 个节点的情况下, B 模型最大连通块中的节点个数不到 60, EAEM 和 FTEL 模型最大连通块中的节点个数均不超过 50, 而 BDDB 模型中最大连通块中节点个数仍多达 70。这是由于在择优连接时, BDDB 模型考虑到节点剩余能量和节点间的距离, 有关因素的全面分析使得选择连接的节点更合理, 有助于增强网络的健壮性, 并且引入了反择优删除机制来删除网络中距离较远、能量消耗较大的链路, 产生的拓扑减少并均衡了能耗, 减少了 WSNs 中由于能量耗尽引起的失效节点数量, 因此 BDDB 模型产生的拓扑具有更强的容错性。

#### 6.5 网络容侵性对比

网络容侵性指在遭受到蓄意攻击时, 网络的容

忍能力。为了衡量 BDDB 模型产生拓扑的容侵能力, 在选择性节点失效的情况下, 将 BDDB 模型与 B、EAEM 和 FTEL 模型进行对比仿真分析, 在仿真时, 按照节点度由大到小的顺序选择移除网络中的节点, 并对比移除节点后网络最大连通分支上的节点数。实验结果取 50 次实验的平均值, 统计结果如图 7 所示。

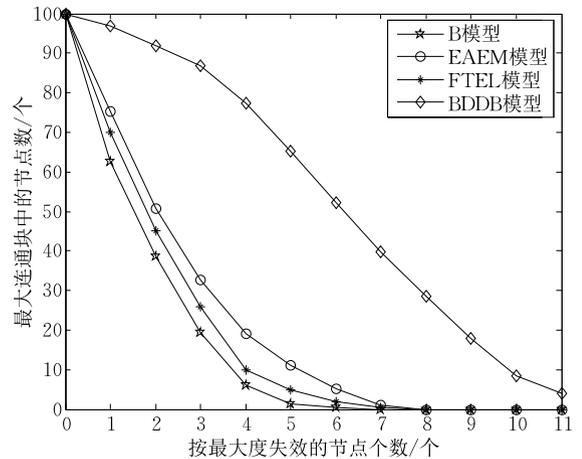


图 7 不同模型的容侵能力对比

由图 7 可知, 在面对选择性节点失效时, BDDB 模型生成的网络具有显著优势, 表现出了更强的容侵能力。从图中可以看出, B 模型在选择性移除 6 个节点, FTEL 和 EAEM 模型在选择性移除 7 个节点时, 网络最大连通块中均已无节点, 因为在无标度拓扑中, 当重要节点遭受到攻击并失效时, 与其相连的邻居节点也受到牵连, 从而使得连通的节点数目急速下降。而 BDDB 模型在选择性移除 11 个节点时, 最大连通分支中仍有节点, 这是因为 BDDB 模型采用了反择优删除机制, 连接重要节点的链路被删除的概率较大, 且没有在已存在节点之间添加新的链路, 因此所得的网络拓扑相对于 B、EAEM 和 FTEL 模型更均匀。综上分析, 说明 BDDB 模型在优化网络容侵性能方面具有优势, 改善了无标度网络在面对选择性攻击时具有脆弱性的问题。

## 7 结束语

本文介绍了无标度机制与利用此机制构建 WSNs 容错拓扑的已有成果。基于网络生命周期与节点剩余能量和节点间距离的关系, 结合链路删除机制, 设计了一种综合考虑与能耗相关因素和网络动态行为的 WSNs 无标度容错拓扑演化模型-BDDB 模型。通过理论和仿真分析验证了 BDDB 模型的无

标度特性, 其幂率指数  $\gamma > 1$ . 通过对生成网络的能量均衡效果进行仿真分析, 验证了 BDDB 模型生成了能耗均衡的拓扑结构; 通过与其他模型的网络生存时间进行对比, 说明了所提模型能有效延长网络的生命期和网络整体的生存时间, 有利于完成既定任务; 通过对比网络的容错性和容侵性, 表明了 BDDB 模型生成的无标度拓扑不仅具有强容错性, 同时还增强了网络的容侵能力. BDDB 模型的提出为设计能耗均衡的 WSNs 容错拓扑提供了新的方向.

**致 谢** 衷心感谢评审专家以及编辑部老师对本篇论文提出宝贵意见和建议!

### 参 考 文 献

- [1] Liu Qiang, Huang Xiao-Hong, Leng Su-Peng. Deployment strategy of wireless sensor networks for Internet of Things. *China Communications*, 2011, 8(8): 111-120
- [2] Si Hai-Fei, Yang Zhong, Wang Jun, et al. Review on research status and application of wireless sensor networks. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, 28(1): 16-20(in Chinese)  
(司海飞, 杨忠, 王珺等. 无线传感器网络研究现状与应用. *机电工程*, 2011, 28(1): 16-20)
- [3] Viani F, Rocca P, Oliveri G, et al. Localization, tracking, and imaging of targets in wireless sensor networks: An invited review. *Radio Science*, 2011, 46(5): 1161-1166
- [4] Emeka E E, Abraham O F. A survey of system architecture requirements for health care-based wireless sensor networks. *Sensors*, 2011, 11(5): 4875-4898
- [5] Fernando L, Antonio-Javier G, Felipe G, et al. A comprehensive approach to WSN-based ITS applications: A survey. *Sensors*, 2011, 11(11): 10220-10265
- [6] Cristina A, Pedro S, Andrés I, et al. Wireless sensor networks for oceanographic monitoring: A systematic review. *Sensors*, 2010, 10(7): 6948-6968
- [7] Ni L M, Liu Y H, Zhu Y M. China's national research project on wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(6): 78-83
- [8] Aziz A A, Sekercioglu Y A, Fitzpatrick P, Ivanovich M. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks. *Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 121-144
- [9] Misra S, Hong S D, Xue G L, et al. Constrained relay node placement in wireless sensor networks to meet connectivity and survivability requirements//Proceedings of the 27th IEEE Communications Society Conference on Computer Communications—INFOCOM 2008. Phoenix, AZ, United States, 2008: 879-887
- [10] Bredin J L, Demaine E D, Hajiaghayi M, et al. Deploying sensor networks with guaranteed fault tolerance. *IEEE ACM Trans Networking*, 2010, 18(1): 216-228
- [11] Hao B, Tang J, Xue G L. Fault-tolerant relay node placement in wireless sensor networks: Formulation and approximation. *Workshop on High Performance Switching & Routing*, 2004, 56(1): 246-250
- [12] Yang Jing, Xu Mai, Zhao Wei, et al. A multi-path routing protocol based on clustering and ant colony optimization for wireless sensor networks. *Sensors*, 2010, 10(5): 4521-4540
- [13] Newman M E J. The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 2003, 45(2): 167-256
- [14] Zhang Lian-Ming, Deng Xiao-Heng, Yu Jian-Ping, et al. Degree and connectivity of the Internet's scale-free topology. *Chinese Physics B*, 2011, 20(4): 558-570
- [15] Qi Xiao-Gang, Ma Shi-Qiang, Zheng Geng-Zhong. Topology evolution of wireless sensor networks based on adaptive free-scale networks. *Journal of Information and Computational Science*, 2011, 8(3): 467-475
- [16] Liu Bin, Dong Ming-Ru, Liu Hao-Ran, et al. A scale-free fault tolerant topology model in wireless sensor network for toleration of comprehensive fault. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 170506-1-170506-8(in Chinese)  
(刘彬, 董明如, 刘浩然等. 基于综合故障的无线传感器网络无标度容错拓扑模型研究. *物理学报*, 2014, 63(17): 170506-1-170506-8)
- [17] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512
- [18] Dorogovtsev S N, Mendes J F F. Scaling properties of scale-free evolving networks: Continuous approach. *Physical Review E*, 2001, 63(5): 056125
- [19] Chen Qing-Hua, Shi Ding-Hua. The modeling of scale-free networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, 335(1): 240-248
- [20] Wang Li-Li, Dang Jian-Xun, Jin Yi, et al. Scale-free topology for large-scale wireless sensor networks//Proceedings of the 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet (ICI 2007). Tashkent, Uzbekistan, 2007: 1-5
- [21] Zhu Hai-Lin, Luo Hong, Peng Hai-Peng. Complex networks-based energy-efficient evolution model for wireless sensor networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2009, 41(4): 1828-1835
- [22] Zheng Geng-Zhong, Liu San-Yang, Qi Xiao-Gang. Scale-free topology evolution for wireless sensor networks with reconstruction mechanism. *Computers and Electrical Engineering*, 2012, 38(3): 643-651
- [23] Zhang De-Gan, Dai Wen-Bo, Niu Qing-Xiao. Local-world weighted topology evolving model for wireless sensor networks. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 1000-1004(in Chinese)

(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. 电子学报, 2012, 40(5): 1000-1004)

- [24] Zheng Geng-Zhong, Liu Qiu-Mei. Scale-free topology evolution for wireless sensor networks. *Computers & Electrical Engineering*, 2013, 39(6): 1779-1788
- [25] Chen Li-Jun, Liu Ming, Chen Dao-Xu, et al. Topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads by random walks. *Chinese Journal of Computers*, 2009, 32(1): 69-76(in Chinese)
- (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. 计算机学报, 2009, 32(1): 69-76)
- [26] Wang Xiao-Yuan, Yang Ya-Qi. Study on a model of topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads and its immunization. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(9): 1321-1323
- [27] Liu Hao-Ran, Yin Wen-Xiao, Han Tao, et al. Wireless sensor network fault tolerant topology for lifetime optimization. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(4): 040509-1-040509-8 (in Chinese)
- (刘浩然, 尹文晓, 韩涛等. 一种优化无线传感器网络生命周期的容错拓扑研究. 物理学报, 2014, 63(4): 040509-1-040509-8)
- [28] Ozik J, Hunt B R, Ott E. Growing networks with geographical attachment preference; emergence of small worlds. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2004, 69(22): 1-5
- [29] Zheng Geng-Zhong, Liu San-Yang, Qi Xiao-Gang. Topology evolution for wireless sensor networks with restorability mechanism. *Journal of Computational Information Systems*, 2011, 7(11): 4098-4104
- [30] Zhang Kai, Han Da-Hai, Feng Hong-Ping. A model of linear expanding in the local-world based on the laws of internal

evolution of the wireless sensor networks//Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, ICCASM 2010. Taiyuan, China, 2010; V4357-V4360

- [31] Tang Wei, Guo Wei. Maximum lifetime genetic routing algorithm in wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010, 21(7): 1646-1656.
- [32] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks// Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii State, United States, 2000, 18: 8020
- [33] Luo Xiao-Juan, Yu Hui-Qun. Topology evolution based on energy-Aware in wireless sensor networks. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(12): 1798-1802 (in Chinese)
- (罗小娟, 虞慧群. 基于能量感知的无线传感器网络拓扑演化. 传感技术学报, 2010, 23(12): 1798-1802)
- [34] Wang Jian-Wei, Li Li-Rong. A model for cascading failures in scale-free networks with a breakdown probability. *Physica A*, 2009, 388(1): 1289-1298
- [35] Liu Hao-Ran, Yin Wen-Xiao, Dong Ming-Ru, et al. Study on the scale-free topology model with strong intrusion-tolerance ability in wireless sensor networks. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 090503-1-090503-8(in Chinese)
- (刘浩然, 尹文晓, 董明如等. 一种强容侵能力的无线传感器网络无标度拓扑模型研究. 物理学报, 2014, 63(9): 090503-1-090503-8)
- [36] Davis T W, Liang X, Navarro M, et al. An Experimental Study of WSN Power Efficiency: MICAz Networks with XMesh. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, 358238(14): 1-12



**LIU Hao-Ran**, born in 1980, Ph. D., professor. His current research interests include topology model for the wireless sensor networks and industrial fault diagnosis, etc.

**SUN Ya-Jing**, born in 1991, M. S. candidate. Her current research interests include fault tolerance and detection for wireless sensor networks.

**LIU Bin**, born in 1953, Ph. D., professor. His current research interests include mill torsional vibration dynamic

behavior and measurement technology, intelligent sensor and the key technologies of wireless sensor networks, intelligent control technology and its application in cement production, etc.

**HAN Li**, born in 1986, Ph. D. candidate. Her current research interests include models of complex network and fault tolerance technologies of wireless sensor networks.

**YIN Rong-Rong**, born in 1985, Ph. D., associate professor. Her current research interests include real platform for wireless sensor networks and fault-tolerant topology model.

## Background

The research in this paper focuses on how to build fault-tolerant topology for Wireless Sensor Networks (WSNs),

balance the energy consumption of the network on the basis of greater tolerance for node failure, then prolong the net-

work lifetime. In WSNs, the energy of sensor nodes is limited, the nodes with lower residual energy may fail prematurely because of the imbalanced energy, and they are often deployed in the bad environment, so the sensor nodes fail frequently. In order to enhance the robustness of networks when the nodes failed, a number of fault-tolerance techniques have been proposed for WSNs specially. However, the research results are most around the redundant nodes and the clustering structure. Although the former enhances the network fault tolerance, but increases the burden of network. In the clustering structure, it can reduce the energy consumption, but a failure of cluster head will lead to part failure of network. So designing a fault-tolerant and energy-balanced topology is a problem that shall be solved immediately.

In recent years, the researches on complex networks become a hotspot, the scale-free networks are proposed by Barabási A L and Albert R, in which the degree distribution obeys power-law distribution. With the deep research of scale-free networks, people found that many large-scale complex networks are scale-free, and this kind of network displays a strong robustness even with high failure rates.

With the help of the theory of scale-free network, in this paper, a new fault-tolerant and energy-balanced topology model is proposed. The analysis of growth dynamic demonstrates that the formed network distribution obeys the power-law distribution, this character which can enhance the ability of fault tolerance, and the model proposed can balance the energy consumption of the whole network. On that basis, a new train of thought is provided to solve the problem of unbalanced energy consumption of the scale-free network, and the network lifetime is extended.

In order to solve the problem of network fault tolerance and balance the energy consumption effectively, our group has studied large number of evolving models, and set up some integrated fault models to stand for the nodes failure in different conditions, obtained good results. This work is supported by the Natural Science Foundations of Hebei Province (F2015203091, F2014203239), the Science and Technology Projects of Hebei Province (15275423), and the Scientific and Technological Research and Development Planning Projects of Qinhuangdao City (201502A216).