

# 基于新型局域世界的无线传感器网络模型研究

王佳丽 李慧嘉 贾传亮

(中央财经大学管理科学与工程学院 北京 100081)

**摘要** 现有的无线传感器网络模型较少考虑能量异构和负载均衡问题,并且对模型的评价方法有限。提出了基于新型局域世界的无线传感器网络模型,充分考虑能量异构、节点局域性以及加入负载调整因子,构建基于能量感知局域世界的无线传感器网络模型和基于负载调整局域世界的无线传感器网络模型,完善原有模型。利用 MATLAB 进行仿真,研究模型度分布等,提出用复杂网络的特征参数对模型进行评价,引入社会网络的中心性,更深入地评价网络节点重要性。理论分析和实验证明,该模型可以较好地描述无线传感器网络,可进一步优化网络和提高通信能力,同时复杂网络的研究思想对无线传感器研发具有指导作用。

**关键词** 无线传感器网络,局域世界,能量感知,负载调整,度分布

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

## Study of Wireless Sensor Network Model Based on Novel Local World Networks

WANG Jia-li LI Hui-jia JIA Chuan-liang

(School of Management and Engineering, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China)

**Abstract** The existing wireless sensor network model seldom considers heterogeneous and load balance. And evaluation method of the model is limited. This paper proposed a wireless sensor network model based on novel local world network and took heterogeneous as well as node localization and local adjustment factor into account. The new model concludes wireless sensor network model based on energy aware local world network and wireless sensor network model based on load regulation local world network, which perfects the original model. By using MATLAB to simulate, this paper studied the degree distribution of the model and proposed an evaluation method of the model by comparing the characteristic parameters of complex networks. It introduces centrality in social network field to evaluate the importance of network node more deeply. Both theoretical analysis and experiment show that new model can describe the wireless sensor network well and can further optimize the network as well as improving communication ability. The idea of complex network used in this paper has positive effect on the research of wireless networks.

**Keywords** Wireless sensor network, Local world, Energy aware, Load regulation, Degree distribution

## 1 引言

复杂网络广泛存在于自然界和人类社会,是复杂性科学中复杂系统的抽象,把系统内部的各个元素作为节点,元素之间的联系作为连接,按照某种规则自然形成或人为构造一种关系或相互作用。复杂网络<sup>[21]</sup>可以用来描述社会各类开放系统的结构变换,从系统结构角度分析系统的功能,是研究系统结构拓扑性和动力学性质的有力工具。自从 Watts<sup>[1]</sup>等提出了小世界网络,Barabási<sup>[2]</sup>等提出了无标度网络,使得复杂网络的研究与运用已经渗透到自然、工程、生物、物理等各个领域。

多跳自组织网络技术、RFID、微电子技术、无线通信技术与传感器技术等各种新技术的发展,推动了无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的产生与发展。无线传感器网络增强了人类对真实物理世界的感知能力,在国防军事、

环境保护监测、灾害监测预报、农业生产、家庭自动化、物联网等诸多领域具有广阔的应用前景,成为目前计算机领域热烈探讨研究的关键技术。如何构建有效的无线传感器网络模型是无线传感器网络研究中的一个关键问题,而复杂网络理论为此研究提供了理论依据。现有的基于复杂网络理论的无线传感器网络模型<sup>[18]</sup>一般只在建模时考虑度的增长,而极少考虑无线传感器网络中节点通信的局域性、负载均衡、能量等重要特征。

针对这些局限性,本文充分考虑网络模型的各种特征参数,提出了一种新颖的无线传感器网络模型构建方法。针对以前较少考虑能量参数及节点局域性等问题的无线传感器网络模型,构建一种考虑能量异构、节点局域性的模型,结合复杂网络的重要特征参数的测试,试图提出可以综合评价网络节点的指标,并预期利用新指标对网络模型进行相关评价。进一步,针对经典复杂网络较少考虑负载均衡问题,试图根据

本文受国家自然科学基金(71901194,91324203,11131009),中财 121 青年博士发展基金(QBJ1410)资助。

王佳丽(1993—),女,硕士生,主要研究方向为复杂网络、数据挖掘,E-mail:wangjiali1993@163.com;李慧嘉(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向为社会网络、数据挖掘、运筹学,E-mail:hjli@amss.ac.cn;贾传亮(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为复杂网络、运筹学、管理决策分析,E-mail:cljia@cufe.edu.cn。

已有研究基础,加入调整负载均衡的因子,得出一个新型无线传感器网络模型。最后,通过比较经典网络模型平均度、最大度等特征参数,得出基于新型负载调整的局域世界无线传感器网络模型的特性,以及与其他网络模型的区别和优势。实证结果表明,基于新型局域世界的无线传感器网络模型能较好地描述无线传感器网络,对无线传感器网络的相关设计等具有一定的理论指导意义。

## 2 概念

### 2.1 复杂网络基本概念

#### 2.1.1 度和度分布

在无向网络当中,节点 $i$ 的度 $k_i$ 表示与节点 $i$ 直接相连的所有边的数目。网络的平均度表示网络中所有节点度值的平均值,一般用 $\langle k \rangle$ 或者 $\bar{k}$ 来表示。设 $P(k)$ 为从网络当中随机选择一个度数为 $k$ 的节点的概率,这就是网络的度分布。

#### 2.1.2 网络平均路径长度

复杂网络中的平均路径长度(average path length),定义为任意两个节点之间的最短距离的平均值,一般用 $L$ 表示,即

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (1)$$

式中, $N$ 为网络节点数目。

#### 2.1.3 聚集系数

假设网络中 $i$ 节点有 $k_i$ 个邻居节点,即 $i$ 节点的度为 $k_i$ 。聚集系数(clustering coefficient)是定量刻画一个给定节点的所有邻居节点集合当中,任意两个节点是否互联的概率,一般用 $C_i$ 表示[3]。

$$C_i = \frac{E_i}{\frac{1}{2}k_i(k_i-1)} = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (2)$$

式中, $E_i$ 是节点 $i$ 的 $k_i$ 个邻居节点之间实际存在的所有的边数和,即节点 $i$ 的 $k_i$ 个邻居节点中实际存在邻居对的数目。聚集系数可以用来反映节点 $i$ 的 $k_i$ 个邻居节点相互连接的紧密程度[4]。

#### 2.1.4 平均最近邻居连接性

平均最近邻居连接性(average nearest-neighbor connectivity)是指一个给定度为 $k$ 的节点的邻居集合的平均度,一般用 $k_m(k)$ 来表示。网络平均最近邻居连接性是复杂网络中计算节点度与度之间相关性(Correlation)的一个非常重要的参数。若 $k_m(k)$ 是 $k$ 的增函数,网络中总体节点度大的节点倾向于连接节点度大的节点,也称网络为度正相关或者该网络是同配的(Assortative);同样,若网络中总体节点度大的节点倾向于连接节点度小的节点,就称该网络是异配的(Disassortative);如果两者没有呈现明显的增函数或减函数,则称网络是中性的[6]。

$$k_m(k) = \frac{1}{N_k} \sum_{i \in M_k} \left( \frac{1}{k} \sum_{j \in N_i} a_{ij} k_j \right) \quad (3)$$

式中, $N_k$ 是网络中度为 $k$ 的节点的数目, $N_i$ 是 $i$ 节点的邻居节点集合。 $M_k$ 是度为 $k$ 的节点集合, $a_{ij}$ 是节点间的邻接矩阵, $k_j$ 为 $j$ 节点的度值。

### 2.2 无线传感器网络基本概念

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是指

所监测区域内部署的大量传感器节点,通过自组织的方式,构成无线通信网络,然后通过节点间的协作来达到对所处物理环境的各种数据进行监测,其目的是为了感知、采集、传输和处理节点所覆盖物理区域中的各种物理信息,并将采集到的信息发布给用户[5]。

## 3 基于新型局域世界的无线传感器网络模型

### 3.1 基于新型能量感知局域世界的无线传感器模型

无线传感器网络中节点的能量存在异构性,节点数量多且传输距离有限,所以节点不可能跟全局网络中的所有节点建立连接。基于无线传感器网络所具有的能量异构性和局域性,本文在引入复杂网络理论方法的基础上[18],提出了能量异构、动态演化的自组织演化模型。在充分考虑了模型的局域性后,结合不同能量分布的函数,使用了平均场的理论计算方法和MATLAB仿真来对此网络模型的各个统计特性进行分析。

#### 3.1.1 模型构造方法

基于随机服务系统中顾客进入的思想[7,8],新进入网络中节点的过程可以由一个带有参数 $\lambda=1$ 的泊松过程来描述。

网络增长模型如下:

(I) 随机增长过程:初始 $m_0$ 个节点的全连通网络。在每一个时隙内,在网络中增加一个节点,并按照一定的能量概率分布随机赋予节点一个能量值 $E_i$ ,新增加节点随机选择 $m$ 个节点发起( $m \leq m_0$ )连边,这里定义LAN由新进入节点选中的节点及其所有邻居构成。对于一个给定的LAN,本文称第一个被随机选中的节点称为中心root节点。网络中所有的节点个数为 $N$ 。

(II) 局域优先连接:新进入的一个节点按照概率 $\Pi(k_i)$ 连至LAN中的节点 $i$ 。

$$\Pi(k_i) = \frac{E_i k_i}{\sum_{j \in L} E_j k_j} \quad (4)$$

$L$ 表示LAN中所有节点的集合。对于每一个新进入的节点, $m$ 次选择的root节点是完全独立的。

#### 3.1.2 模型的度分布求解

对于网络中一个已经存在的节点 $i$ ,在第 $(t+1)$ 个事件发生前,有以下3种状态:

- (1) 以 $1/(m_0+t)$ 的概率被选作root节点;
- (2) 以 $k_i/(m_0+t)$ 的概率被选作LAN中的一个,但不是root节点;
- (3) 以 $1-(k_i+1)/(m_0+t)$ 的概率不被选作LAN中的一个。

所以根据平均场理论[11]可以得到节点 $i$ 的度变化速率为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \frac{1}{m_0+t} \frac{E_i k_i}{\sum_{j \in L_i} E_j k_j} + m \frac{k_i}{m_0+t} \frac{E_i k_i}{\sum_{j \in L_i} E_j k_j} \quad (5)$$

其中, $k_i(t)$ 表示 $i$ 节点在 $t_i$ 时刻的度, $L_i$ 表示以 $i$ 为root节点的所有节点的集合(包括 $i$ 节点), $L_s$ 表示 $i$ 节点的邻居 $s$ 节点为root节点的节点集合, $E_i$ 为节点 $i$ 的能量值。式(5)中第一部分代表(1)情况下对度速率的贡献,式中的第二部分代表(2)情况下对度速率的贡献。

在可以得到时间 $t$ 后,网络中所有的节点个数为 $N=m_0+t$ ,网络中共有 $E=e_0+t$ 条边,而此处初始网络中的边数为

$E_0 = m_0(m_0 + 1)/2$ 。网络中所有节点的平均度为

$$\bar{k} = \frac{2E}{N} = \frac{2mt + E_0}{m_0 + t} \rightarrow 2m, (t \rightarrow \infty) \quad (6)$$

忽略度间关联性, 可得:

$$\sum_{j \in L_i} E_j \cdot k_j = \sum_{j \in L_i} E_j \cdot k_j \approx \bar{E} \cdot \sum_{j \in L_i} k_j = \bar{E} \cdot (k_i + 1) \bar{k} \quad (7)$$

将式(6)、式(7)代入式(5)后, 可以得到

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{m}{m_0 + t} \cdot \frac{E_i}{\bar{E}} \cdot \frac{(k_i + 1)k_i}{k(k_i + 1)} \approx \frac{k_i \cdot f(E_i)}{2t} \quad (8)$$

假设节点  $i$  是在  $t_i$  加入网络的, 那么将微分方程的初始条件  $k(t_i) = m$  代入上式后, 可以得到

$$k_i = m \left( \frac{t}{t_i} \right)^{\frac{f(E_i)}{2}} \quad (9)$$

假设当时间  $t \rightarrow \infty$  时, 度分布  $P(k(t))$  收敛于稳态的度分布  $P(k)$ 。由概率定义有

$$p(k) = \frac{\partial P(k_i(t) < k)}{\partial k} \quad (10)$$

由式(9), 可以得到

$$P(k_i(t) < k) = P(t_i > g(k, t)) \quad (11)$$

此时  $g(k, t) = t(m/k_i)^{2/f(E)}$ 。

假设是以相等的时间间隔添加节点的, 那么  $t_i$  的概率密度为

$$P(t_i) = \frac{1}{m_0 + t} \quad (12)$$

所以有

$$P(t_i > g(k, t)) = 1 - P(t_i \leq g(k, t)) = 1 - \frac{t}{m_0 + t} \left( \frac{m}{k_i} \right)^{\frac{2}{f(E)}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(10)后, 得到

$$p(k) = \frac{\partial P(k_i(t) < k)}{\partial k} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \rho(E) \cdot 2m^{\frac{2}{f(E)}} \cdot k_i^{-[\frac{2}{f(E)} + 1]} dE \quad (14)$$

可得基于新型能量感知局域世界的无线传感器网络模型的度分布为幂律分布, 幂律指数为  $\gamma = 1 + 2/f(E)$ 。

利用 MATLAB 对基于能量感知局域世界的无线传感器模型进行仿真实验。如图 1(a) 所示, 在网络规模  $N=10000$ , 初始节点数目  $m_0=3$ , 能量在  $[0.5, 1.0]$  均匀分布时, 仿真了  $m=1, m=2, m=3$  等不同  $m$  值下的度分布, 可知  $m$  值对度分布的影响很小, 与上述的理论推导一致。如图 1(b) 所示, 在  $N=10000, m_0=m=3$  的情况下, 仿真能量均匀分布、指数分布和正态分布下的度分布<sup>[20]</sup>, 统计后会发现能量分布的不同对网络度分布的影响非常小, 模型与上述理论推导一致, 是幂指数为  $\gamma = 1 + 2/f(E)$  的幂律分布。

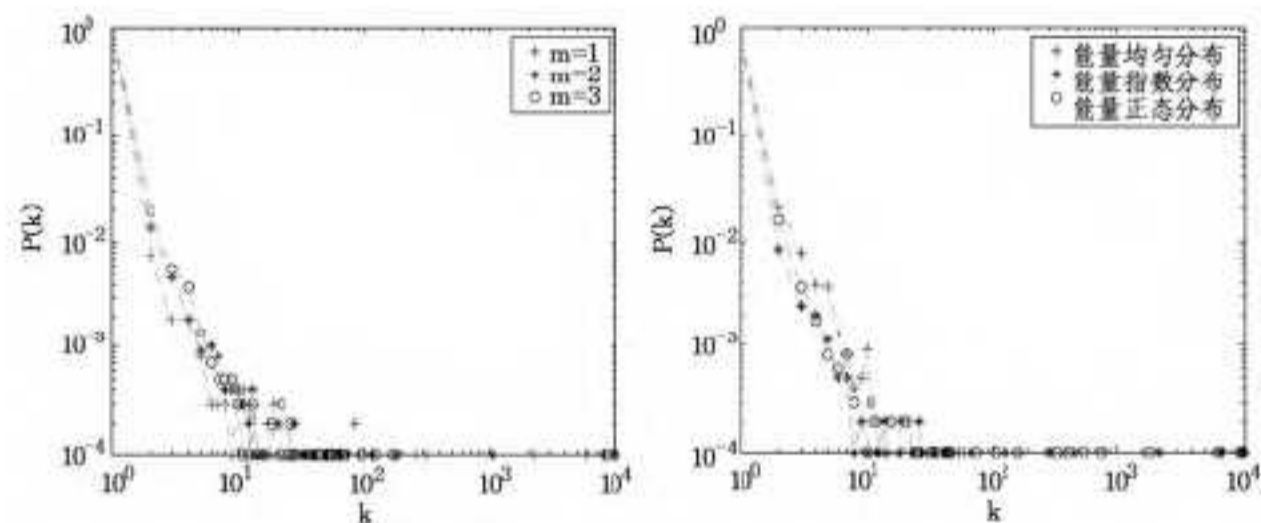


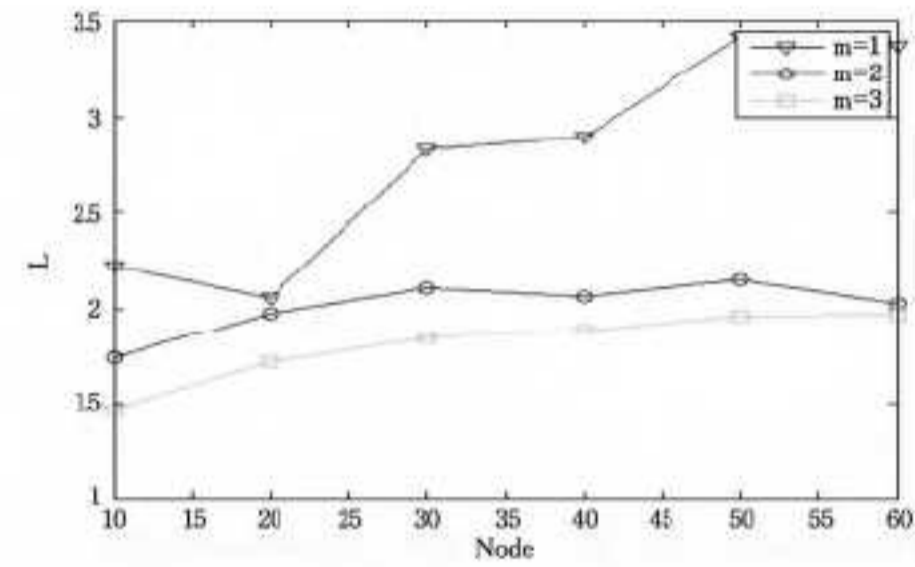
图 1 基于能量感知局域世界的模型仿真实验结果

### 3.1.3 模型各种参数评价

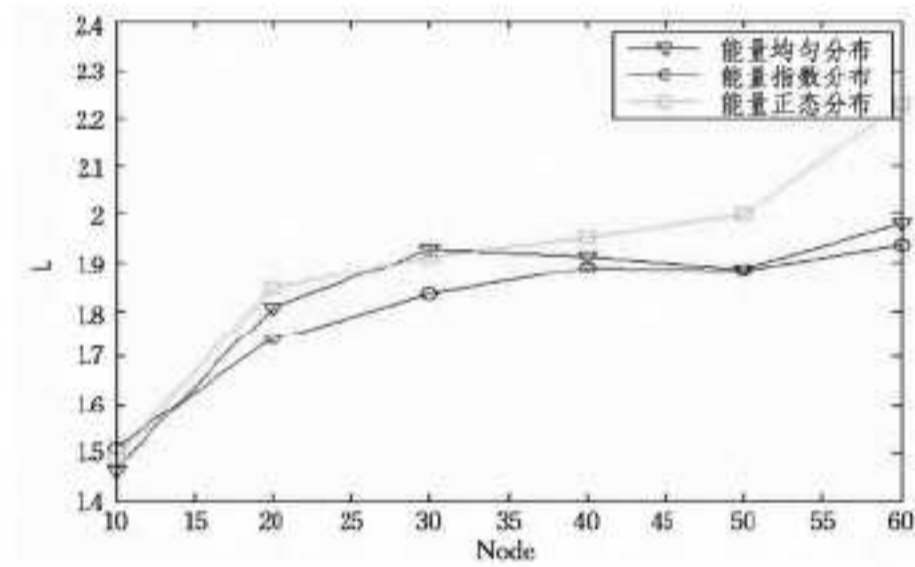
#### 1. 平均路径长度

图 2(a) 所示为在  $m_0=3$ , 能量为均匀分布的情况下, 不同的  $m$  值在一定的网络规模得到的曲线图。在  $m=1, m=2, m=3$  时, 网络的平均路径程度相差较大, 其中  $m=1$  时, 网络的平均路径长度最大, 这是因为新节点在进入网络时, 只与网络当中一个节点进行连接, 使得网络整体较稀疏。

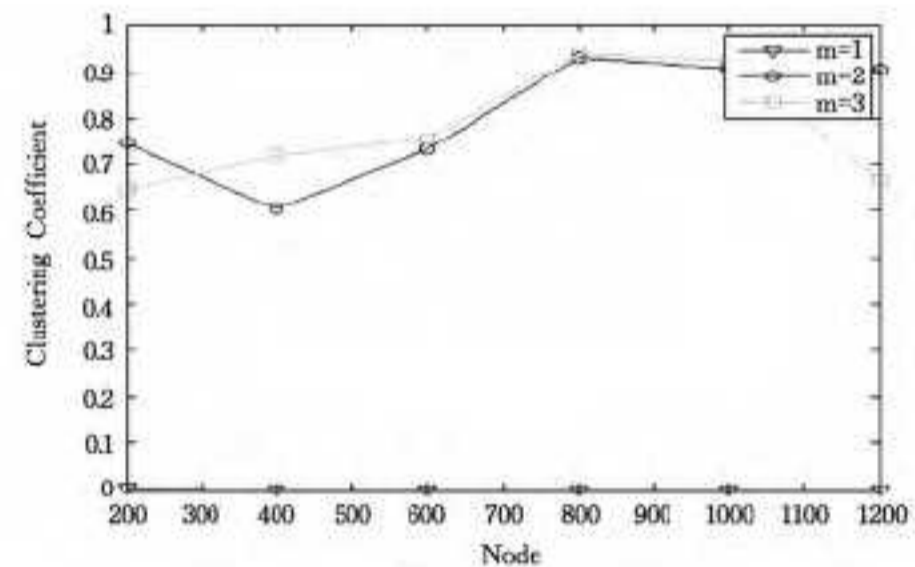
如图 2(b) 所示, 在  $m_0=m=3$  时, 3 种不同能量分布下平均路径长度是较为一致的, 所以能量分布对网络的平均最短路径影响很小。



(a) 均匀分布下, 不同  $m$  值的网络平均路径长度



(b) 不同能量分布下的网络平均路径长度



(c) 均匀分布下, 不同  $m$  值的平均聚集系数

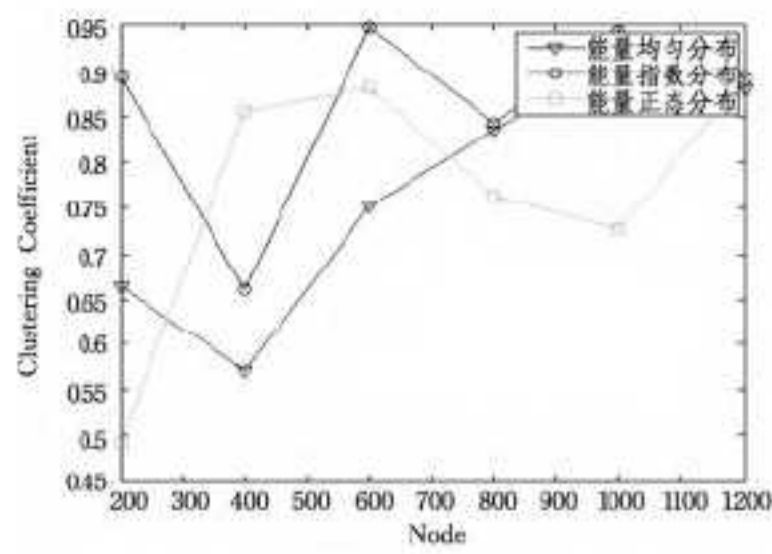
图 2 基于能量感知局域世界的模型特征参数评价

#### 2. 聚集系数

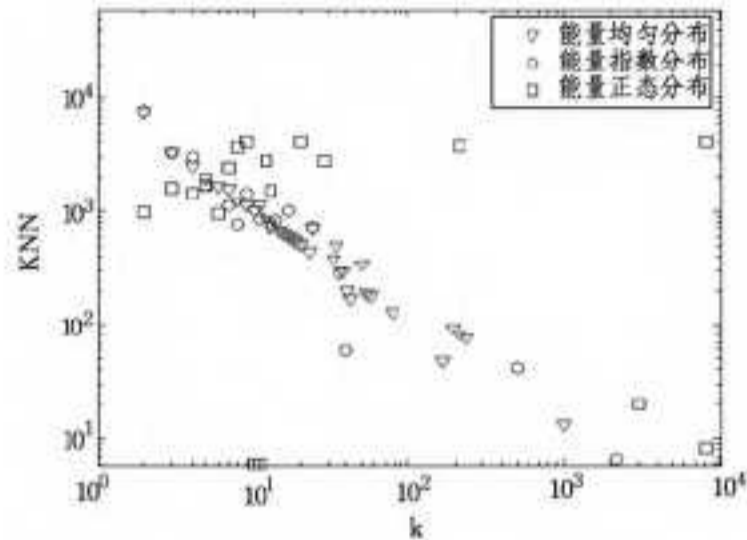
通过仿真, 从图 2(c) 可以发现, 在  $m_0=3$ , 能量为均匀分布的情况下, 不同  $m$  值平均聚集系数之间差别较小。  $m=1$  时网络的聚集系数接近于 0, 原因同上。当  $m=2$  和  $m=3$  时网络的聚集系数都很高, 都在 0.6 以上。如图 3(a) 所示, 在  $m_0=m=3$ , 不同能量分布下, 网络的聚集系数显得乱一些, 但是都稳定在 0.5 以上, 所以可以得到能量分布对网络聚集系数有影响但影响不大的结论。

#### 3. 最近邻居连接性

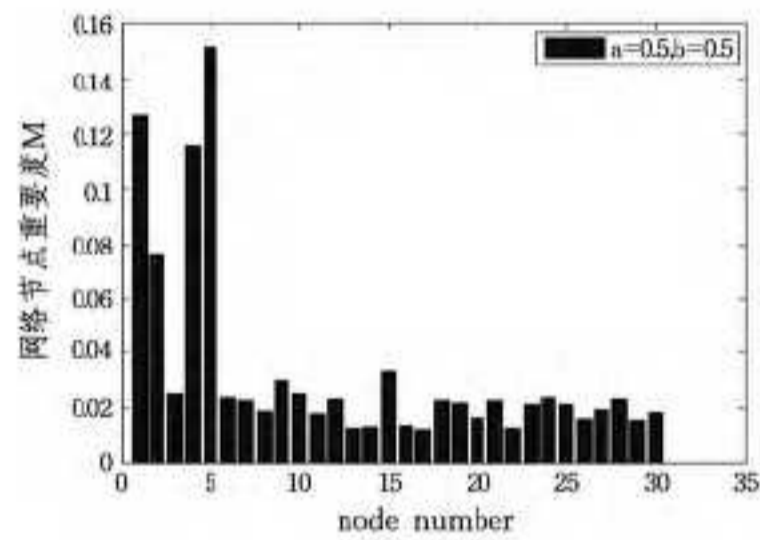
如图 3(b) 所示, 仿真显示在能量分布为均匀分布和指数分布时, 模型中  $k_m(k)$  是  $k$  的减函数, 所以此时模型为异配网络。当网络中能量为均匀分布时, 网络模型没有表现出明显的增减性, 所以这种能量分布下, 网络为中性网络。



(a) 不同能量分布下的网络平均聚集系数



(b) 不同能量分布下的网络平均最近邻居连接性



(c) 均匀分布下, 节点重要性评价示意图

图3 无线传感器网络模型的其他评价指标仿真结果

### 3.1.4 无线传感器网络节点重要性评价

无线传感器网络的节点重要程度, 不仅要考虑节点的度数(度中心性), 也要考虑节点所处位置和节点能量值。本文引入社会网络<sup>[13,14]</sup>中的“中心性”概念, 即介数中心性。

介数的定义: 在有  $N$  个节点的无线传感器网络中, 如果任意两个节点之间的最短路径都要经过节点  $i$ , 那么对节点  $i$  来说, 对整个无线传感器网络的拓扑结构重要性的贡献为:

$$C_m(i) = \frac{\sum_{j < k} g_{jk}(i) / g_{jk}}{(N-1)(N-2)/2} \quad (15)$$

式中,  $g_{jk}$  表示节点对  $j$  与  $k$  的最短路径数目,  $g_{jk}(i)$  表示节点对  $j$  与  $k$  之间经过节点  $i$  的最短路径数目。介数的定义最早在 1977 年就由 Freeman 定义<sup>[9]</sup>, 表征节点对之间沿着最短路径通过节点  $i$  传输信息的能力, 这个参数描述了单个节点对于网络中传输的影响能力, 介数越高则节点的重要程度也就越高。然而拓扑结构只能从一个侧面反映节点在网络中的影响能力, 因此在全局范围内应该把传感器节点的能量因素考虑进去。

为综合上述因素, 本文采取加权的方法对无线传感器网络节点的重要性定义为:

$$M(i) = a * C_m(i) + b * f(E) \quad (16)$$

其中,  $a$  为拓扑贡献调节因子,  $b$  为剩余能量调节因子, 并且  $a+b=1, 0 < a < 1, 0 < b < 1$ 。  $C_m(i)$  体现了节点位置对于节点重要性评价的贡献,  $f(E)$  体现了节点能量对节点重要性的评价。

式(16)综合考虑了无线传感器网络中网络拓扑结构和节

点剩余能量两个关键因素。

图 3(c) 示出在  $N=30, m_0=m=3$ , 且能量分布为均匀分布下节点重要性评价指标的仿真实验结果。

基于新型能量感知局域世界的无线传感器网络模型, 考虑了能量异构性和节点局域性, 实验得出, 该网络具有无标度的度分布、较高的聚集系数、较小的平均路径长度及异配性。

### 3.2 基于新型负载调整局域世界的无线传感器模型

本文在 3.1 节中研究了基于新型能量感知局域世界的无线传感器模型的相关结构和特性, 但是我们发现如果能够降低节点负载, 调整能量分布, 会使基于新型局域世界的无线传感器网络模型更加有效<sup>[16]</sup>。为了使模型负载能够更加均衡, 本文进一步调整基于能量感知局域世界的无线传感器网络模型。根据汪秉宏等<sup>[10]</sup>的发现, 在用 BA 模型研究巨大规模通讯网络时, 对概率中的度数  $k$  添加了一个  $\alpha=-1$  的指数, 因为  $-1$  是最符合网络实际的参数同时较易实现, 所以整个网络具有最大通讯能力。基于此, 接下来将试图为 3.1 节提出的网络模型进行赋权调整<sup>[17,19]</sup>, 构造一个经过负载调整的局域世界优先连接无线传感器网络模型。

#### 3.2.1 模型构造方法

与上节类似, 分为两个步骤:

(I) 随机增长过程: 同上节的网络模型初始过程。

(II) 局域优先连接: 新进入的一个节点连至 LAN 中的节点  $i$ , 按照概率

$$\Pi(k_i) = \frac{E_i k_i^{-1}}{\sum_{j \in L} E_j k_j^{-1}} \quad (17)$$

$L$  表示 LAN 中所有节点的集合。对于每一个新进入的节点,  $m$  次选择的 root 节点是完全独立的。

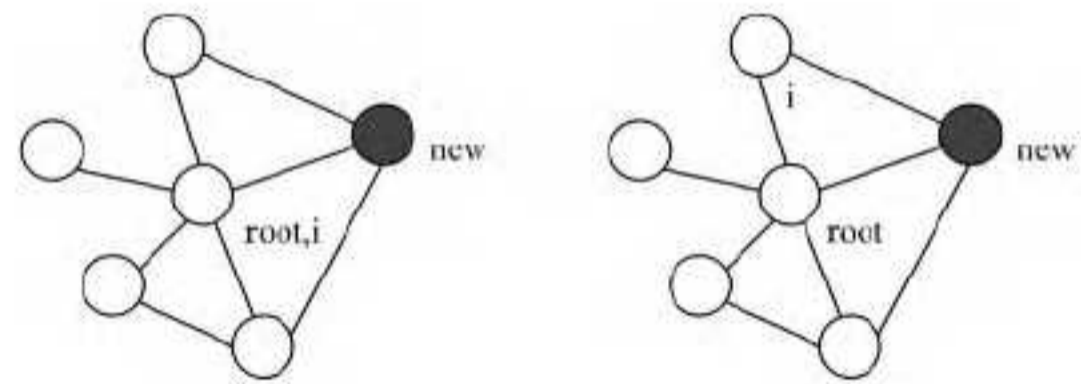


图4 节点度的两种增长方式

#### 3.2.2 模型的度分布求解

与上节过程假设一致, 根据平均场理论<sup>[8]</sup>可以得到  $i$  节点的度变化速率为

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \frac{1}{m_0 + t} \frac{E_i k_i^{-1}}{\sum_{j \in L_i} E_j k_j^{-1}} + m \frac{k_i}{m_0 + t} \frac{E_i k_i^{-1}}{\sum_{j \in L_s} E_j k_j^{-1}} \quad (18)$$

其中,  $k_i(t)$  表示  $i$  节点在  $t_i$  时刻的度,  $L_i$  表示以  $i$  节点为 root 节点的所有节点的集合(包括  $i$  节点),  $L_s$  表示以  $i$  节点的邻居  $s$  节点为 root 节点的节点集合,  $E_i$  为节点  $i$  的能量值。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_i}{\partial t} &= m \cdot \frac{(1+k_i)}{m_0 + t} \cdot \frac{E_i}{E} \cdot \frac{k_i^{-1}}{\sum_{j \in L_i} k_j^{-1}} \\ &\approx m \cdot \frac{(1+k_i)}{m_0 + t} \cdot \frac{E_i}{E} \cdot \frac{k_i^{-1}}{k_i^{-1} + 1} = \frac{m}{t} \cdot f(E) \end{aligned} \quad (19)$$

将初始条件  $k_i(t_i) = m$  代入后, 得到

$$k_i = \frac{m}{f(E)} \ln\left(\frac{t}{t_i}\right) + m \quad (20)$$

$$P(k_i(t) < k) = p(t_i > g(k, t)) \quad (21)$$

这里

$$g(k, t) = t \cdot e^{1 - \frac{k}{m}} \cdot e^{f(E)}, f(E) = \frac{E_i}{E} \quad (22)$$

既然节点按照参数  $\lambda=1$  的泊松过程进入了网络, 也就是

说进入时间  $t_i$  是  $\Gamma$  分布。这样,服从幂律分布公式的网络度分布可以重新写为

$$P(k_i(t) < k) = 1 - P(t_i \leq g(k, t)) = e^{-g(k, t)} \sum_{l=0}^{i-1} \frac{(g(k, t))^l}{l!} \quad (23)$$

$$P(k_i(t) = k) = \frac{\partial P(k_i(t) < k)}{\partial k} = -e^{-g(k, t)} \frac{\partial g(k, t)}{\partial k} \frac{(g(k, t))^{i-1}}{(i-1)!} \quad (24)$$

这样,可以获得一个平稳的度分布。

$$\begin{aligned} P(k) &= \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \rho(E) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t P(k_i(t) = k) dE \\ &\approx \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \rho(E) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{\infty} P(k_i(t) = k) dE \\ &= - \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \rho(E) \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \frac{\partial g(k, t)}{\partial k} dE \\ &= \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \rho(E) \frac{e^{1+f(E)}}{m} e^{-\frac{k}{m}} dE \propto \frac{e^{f(E)}}{m} e^{-\frac{k}{m}} \quad (25) \end{aligned}$$

通过理论计算及仿真模拟,基于能量感知局域世界的无线传感器网络模型具有指数分布的度分布。如图 5(a) 所示,  $m$  值的不同对度指数的大小是有影响的,与理论推导相符。图 5(b) 示出能量分布对度分布的影响很小。

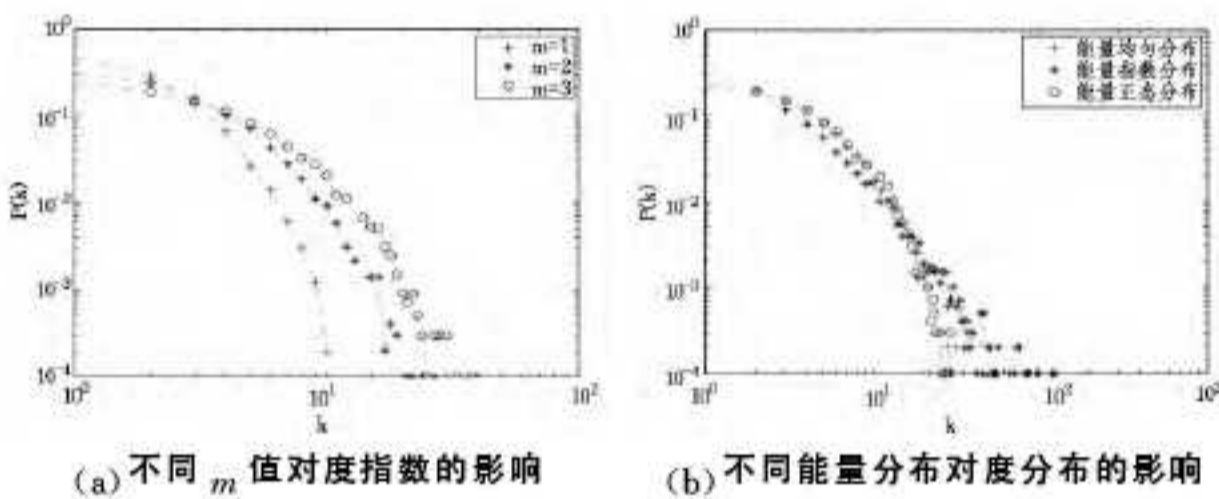


图 5 基于负载调整局域世界的模型仿真实验结果

### 3.2.3 模型各种参数评价

负载均衡局域世界的无线传感器网络模型的平均路径长度比上一节所提出的模型要大一些。如图 6(a) 所示,在  $m_0 = 3$ , 能量为均匀分布且网络规模为 60 个节点时,网络平均路径长度已经高达 6,说明这个模型不具有小世界特征。同时图 6(b) 示出,在  $m_0 = m = 3$  时,不同的能量分布对平均路径长度的影响不大。

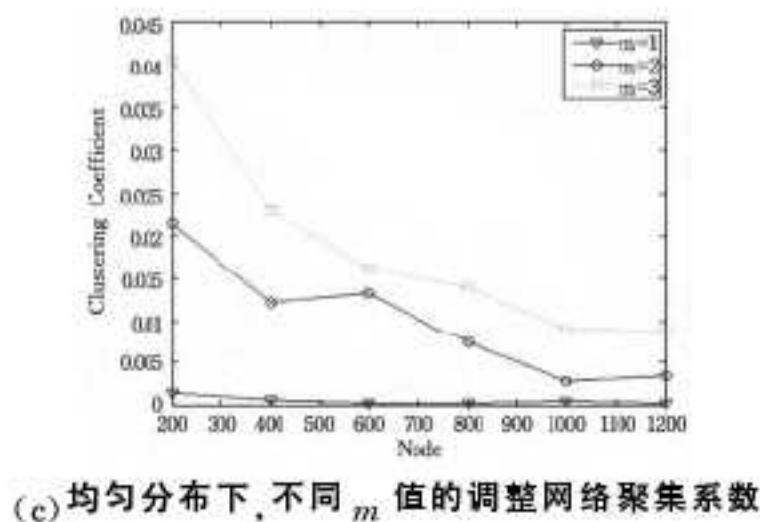
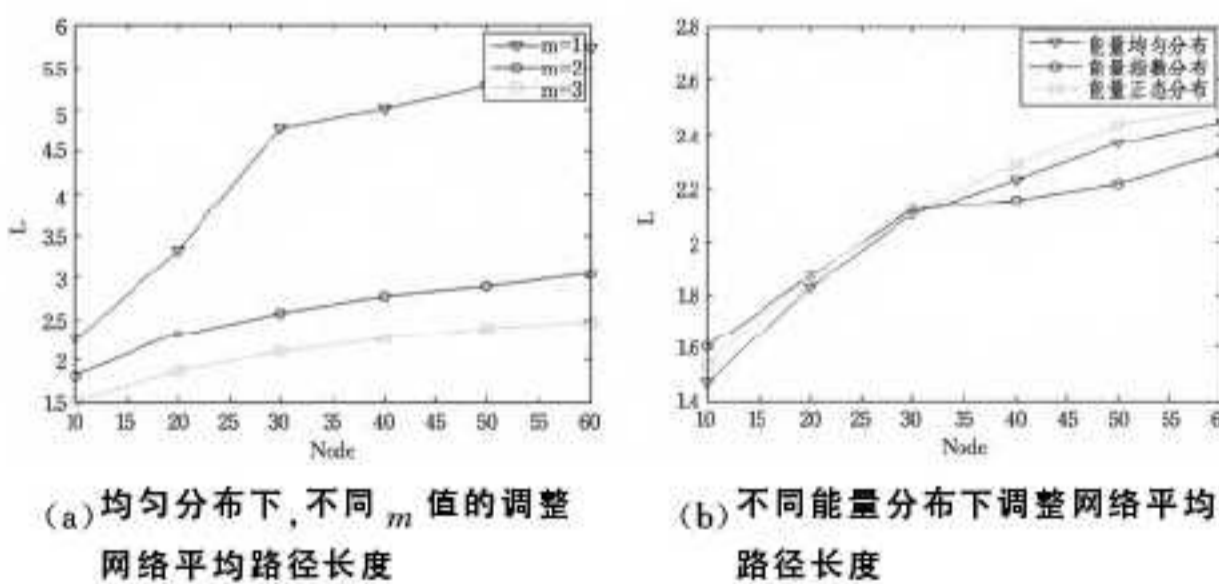


图 6 基于负载调整局域世界的模型特征参数评价

如图 6(c) 所示,所提网络模型的聚集系数基本都非常小,无论  $m$  值如何,能量为均匀分布的情况下,聚集系数的值基本都低于 0.04。同样如图 7(a) 所示,在  $m_0 = m = 3$  时,不同能量分布下的平均聚集系数也都非常低。

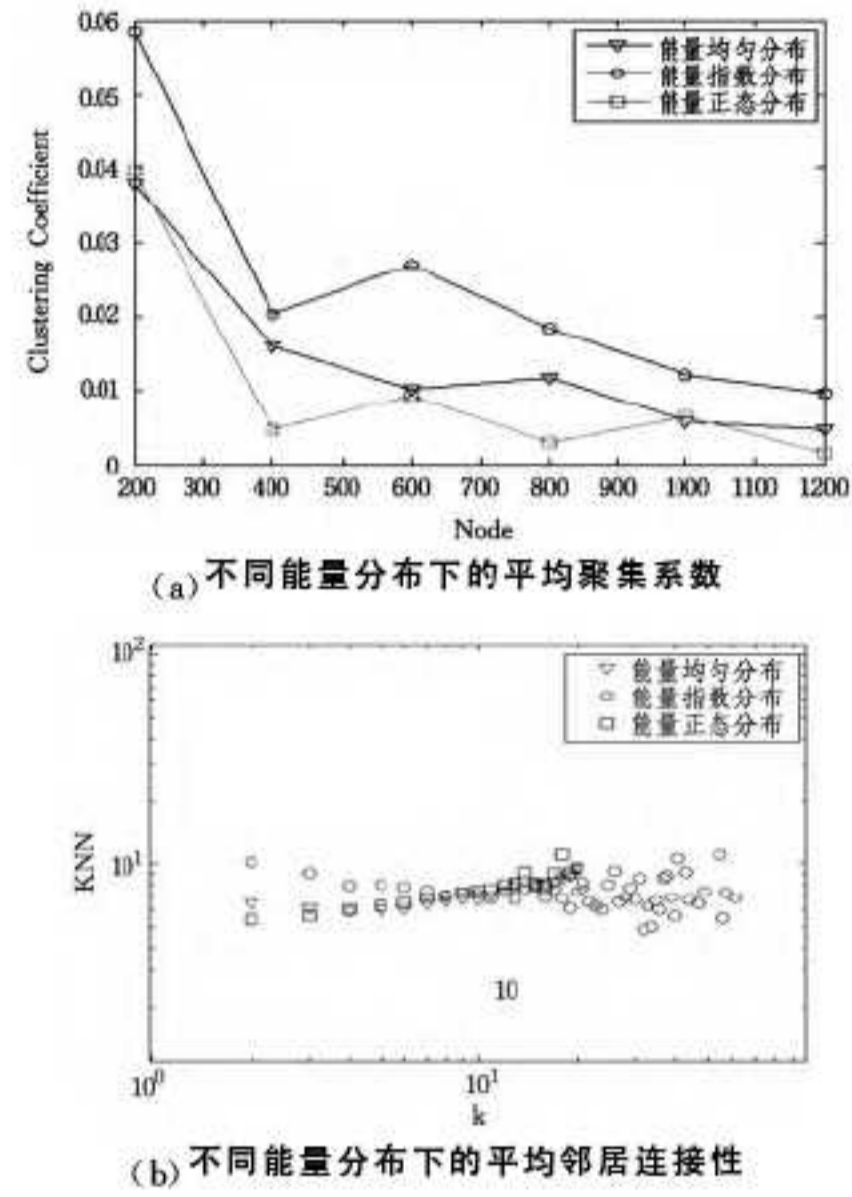


图 7 无线传感器网络模型的其他评价指标仿真结果

经过调整的模型平均最近邻居连接如图 7(b) 所示,仿真结果显示,能量分布对该模型平均最近邻居连接性的影响很小,模型中  $k_m(k)$  是  $k$  的增函数,所以此时网络模型为同配网络。

### 3.2.4 实证比较

根据 3.2.3 节中提出的综合考虑能量异构、负载均衡和节点局域性的无线传感器网络模型,进行模型实证分析。

在  $N=30, m_0=3, m=2$  时候,模型生成的网络拓扑图如 8 所示,我们发现不存在度数很大的节点。

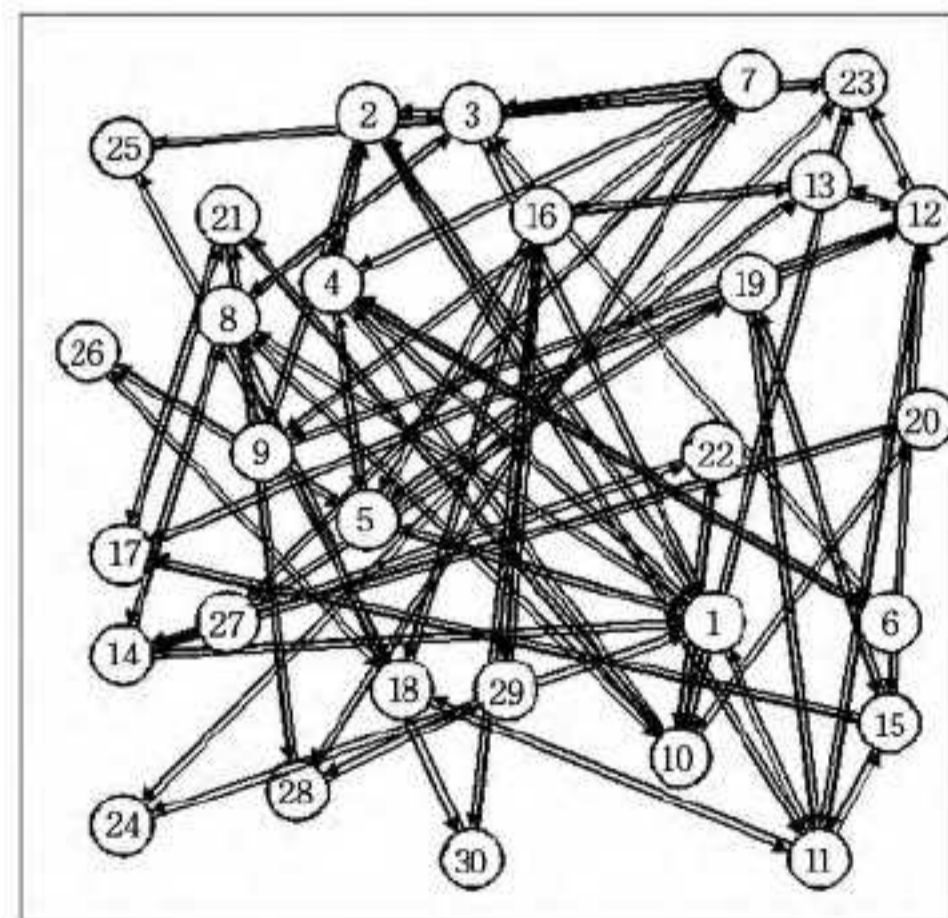
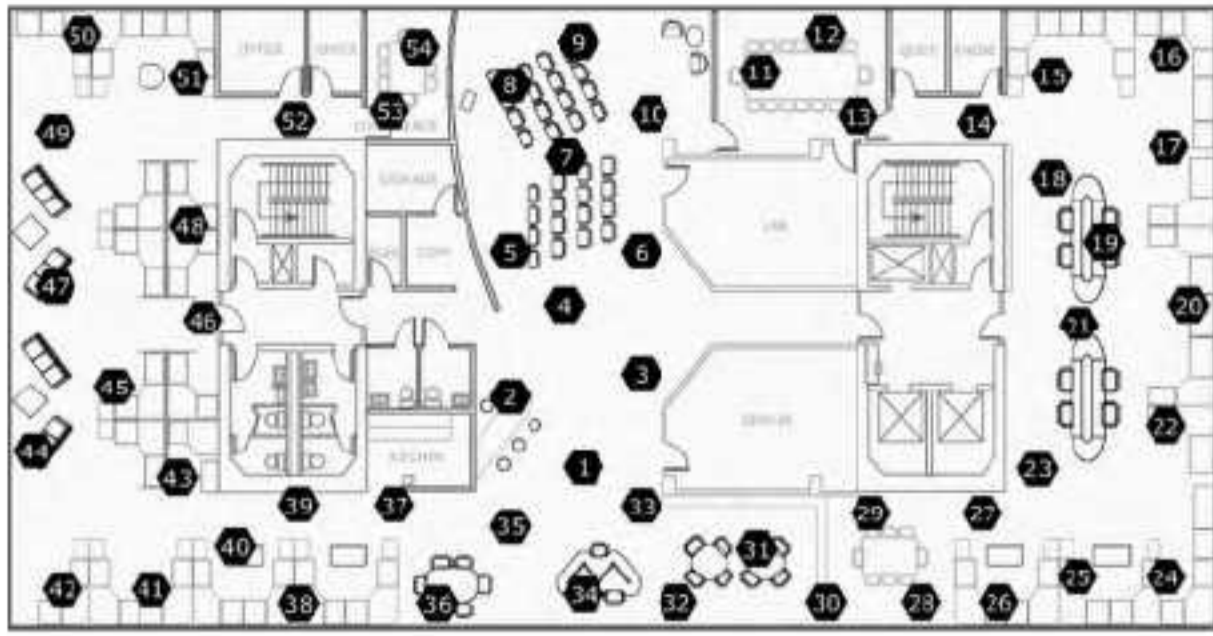


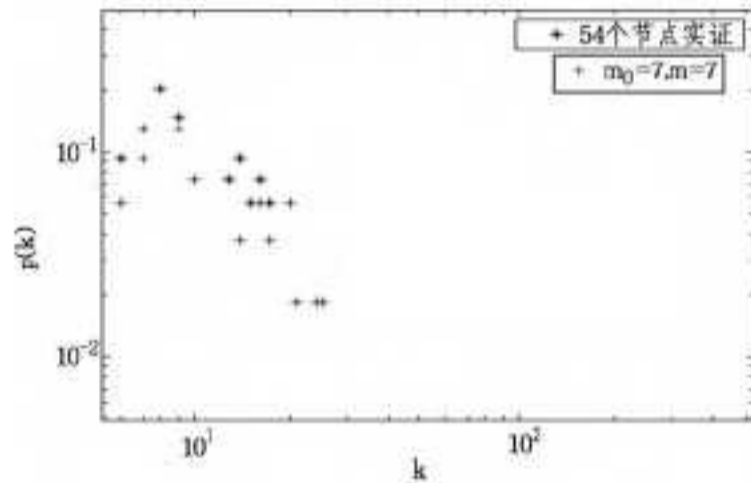
图 8 在  $N=30, m_0=3, m=2$  下生成网络的拓扑图

进一步,利用英特尔伯克利实验室的研究所得到的数据集来进行模型的实证研究<sup>[11]</sup>,这个数据集由 54 个传感器节点所组成,如图 9(a) 所示。通过设置仿真模型的参数,在  $N=54, m_0=m=7$  时,通过比较上面的数据集(结果如图 9(b) 所示),各种模型参数比较研究结果如表 1 所列。数值模拟实验表明基于负载调整局域世界的无线传感器网络模型能够较好地再现实证结构的度分布特性。3.2 节所提的网络模型在一定程度上揭示了无线传感器网络演化的内在驱动机制<sup>[15]</sup>,有

助于人们理解无线传感器网络在不同尺度结构之间的相互影响和相互作用。



(a) 在英特尔伯克利实验室布置的传感器节点图



(b) 54 个传感器节点的实证分析结果

图 9 54 个传感器节点数据实证研究

表 1 各种模型参数对比

模型	平均度 (1000 nodes)	最大度	度分布	是否存在超 级节点(最 大度过 100)	是否考 虑能量 参数
ER 随机 网络 模型	$P(N-1) \approx 100$ ( $p=0.1$ )	130	泊松 分布	是	否
BA 无标 度网络 模型	$(m_1 + e_0)/(m_0 + t) = 3$ ( $m_0 = 3, m = 3$ )	280	幂律分 布, 幂指 数为 3	是	否
WS 小世 界网络 模型	$1/2(NKp) = 200$ ( $K = 2, p = 0.2$ )	260	泊松 分布	是	否
负载调 整局域 世界网 络模型	$(m_1 + e_0)/(m_0 + t) = 3$ ( $m_0 = 3, m = 3$ )	51	泊松 分布	否	是

**结束语** 在本文中,我们提出了两种新颖而高效的基于新型局域世界的无线传感器网络模型。这些模型不同于现有传感器网络模型,将能量异构、节点局域性和负载均衡等因素综合考虑。首先构建基于能量感知局域世界的无线传感器网络模型,研究其度分布以及平均路径长度等基本特征参数,并创新性地提出节点重要性评价指标,以优化网络拓扑结构、增强网络通信能力。进一步,考虑负载均衡特性,将其改进为基于负载调整局域世界的无线传感器网络模型, MATLAB 仿真得出该网络具有指数分布的度分布、较小的聚集系数以及同配性,具有随机网络的度分布特性,但是不存在其它网络模型中常见的超级节点,负载相比较各种网络模型更为均衡,结合数值模拟实验,表明本文所提的网络模型能够较好地再现实证结构。无线传感器网络应用前景广阔,本文研究中,使用了复杂网络的研究方法,希望可以为无线传感器网络模型的构建和日后应用提供更多思路。综上所述,本文从一个全新的角度,提出基于新型局域世界的无线传感器网络模型,对于现实中无线传感器网络的相关设计等具有重要的理论指导意义。

## 参考文献

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442
- [2] Barabási A-L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
- [3] Ravasz E, Barabási A L. Hierarchical organization in complex networks [J]. Physical Review E, 2003, 67(2): 026112
- [4] Li Hui-jia, Zhang Xiang-sun. Analysis of stability of community structure across multiple hierarchical levels [J]. Europhysics Letters, 2013, 103(5): 58002
- [5] Sha K, Gehlot J, Greve R. Multipath routing techniques in wireless sensor networks: A survey [J]. Wireless personal communications, 2013, 70(2): 807-829
- [6] Newman M E J. Assortative mixing in networks [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(20): 208701
- [7] 郭进利, 汪丽娜. 幂律指数在 1 与 3 之间的一类无标度网络 [J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5635-5639
- [8] Gross D, Shortle J F, Thompson J M, et al. Fundamentals of queueing theory [M]. John Wiley & Sons, 2013
- [9] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification [J]. Social networks, 1979, 1(3): 215-239
- [10] 汪秉宏. 通讯网络—基于局域信息的最佳路由研究 [M] // 郭雷, 许晓鸣, 史定华. 复杂网络. 上海: 上海科技教育出版社, 2006
- [11] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512
- [12] 沈华伟, 程学旗, 陈海强, 等. 基于信息瓶颈的社区发现 [J]. 计算机学报, 2008, 31(4): 677-686
- [13] 李慧嘉. 基于信息扩散的多尺度重叠社区快速探测算法 [J]. 计算机科学, 2014, 41(9): 125-131
- [14] Li Hui-jia, Zhang Jun-hua, Liu Zhi-ping, et al. Identifying overlapping communities in social networks using multi-scale local information expansion [J]. European Physical Journal B, 2012, 85(6): 109
- [15] Bodik P, Hong W, Guestrin C, et al. Intel lab data [OL]. Online dataset, 2004. <http://db.csail.mit.edu/labdata/labdata.html>
- [16] Li Hui-jia, Xu Bing-ying, Zheng Liang, et al. Integrating attributes of nodes solves the community structure partition effectively [J]. Modern Physics Letters B, 2014, 28(05): 1450037
- [17] 马英红, 李慧嘉, 张晓东. 赋权网络中的弱化免疫研究 [J]. 管理科学学报, 2010, 13(10): 32-39
- [18] Rosvall M, Bergstrom C T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(4): 1118-1123
- [19] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in large networks [J]. Journal of Statistical mechanics—Theory and experiment, 2008, 10: 10008
- [20] Baras J S, Hovareshti P. Efficient and robust communication topologies for distributed decision making in networked systems [C] // Proceedings of 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008: 2973-2978
- [21] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. Physical Review E, 2004, 6(2): 026113