

引用格式:刘小涛,陈珍萍,黄友锐. 一种基于能耗均衡的非均匀分簇路由算法[J]. 微电子学与计算机,2019,36(2):36-40.
[LIU X T, CHEN Z P, HUANG Y R. An uneven clustering routing algorithm based on energy consumption balance [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(2): 36-40.]

一种基于能耗均衡的非均匀分簇路由算法

刘小涛¹, 陈珍萍², 黄友锐¹

(1 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;

2 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘 要: 针对在一些链状结构拓扑应用中, 传统 WSNs 路由存在严重的能耗不均衡问题, 提出了一种能耗均衡的非均匀分簇路由算法。在簇首选举阶段, 提出了一种基于定时器的选举方法, 在全局网络中每个节点根据相对剩余能量和与汇聚节点的距离设置竞争簇首的时间, 时间越小成功竞选概率越大; 在成簇阶段, 节点根据保存的簇首信息, 选择加入距离最近且通信半径更大的簇; 在数据传输阶段, 簇首以相对剩余能量和能量开销指标为参数构建基于最小生成树的最优多跳路径。仿真结果表明, 与已有的分簇路由协议 LEACH、DEEC 和 EEUC 相比, 所提算法更能有效均衡能量消耗, 延长网络生命周期。

关键词: 链状拓扑; WSNs; 分簇路由; 能耗均衡; 网络生命周期

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2019)02—0036—05

An Uneven Clustering Routing Algorithm Based on Energy Consumption Balance

LIU Xiao-tao¹, CHEN Zhen-ping², HUANG You-rui¹

(1 College of Electrical and Information Engineering, Anhui university of science and technology, Huainan 232001, China; 2 College of Electronic and Information Engineering, Suzhou university of science and technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Aiming at some chain topology applications, there is a serious imbalance of energy consumption in traditional WSNs routing. This paper proposes an energy balanced and uneven clustering routing algorithm. In the cluster head election stage, an election method based on the timer is proposed. In the global network, each node sets the time of competition according to the relative residual energy and the distance from the converging node. The smaller the time is, the more successful election probability is, the higher the election probability is. In the data transmission phase, the cluster head constructs the optimal multi hop path based on the minimum spanning tree with the parameters of the relative residual energy and the energy cost. The simulation results show that compared with the existing cluster routing protocols LEACH, DEEC and EEUC, the proposed algorithm can effectively balance the energy consumption and prolong the network life cycle.

Key words: chain topology; wireless sensor networks; cluster routing; energy consumption balance; network life cycle

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由大量体积微小、价格低廉的传感器节点通过无线通信方式形成的新型自组织网络^[1]. 被广泛应用于军事国防、环境监测、工业监控、家居智能、抢险救灾等领域. 链状结构拓扑与传统的矩形内随机抛撒结构不同,节点横向跨度长,纵向窄,且传感器节点通常在人类难以到达的复杂环境下使用,节点能量的二次补充非常困难,将会更容易引起网络中各节点能耗的不均衡,一些节点过早死亡,导致网络空洞. 因此,均衡节点能耗,延长网络生命周期是一项重要的任务^[2].

路由技术是 WSNs 的关键,对均衡节点能耗、延长网络生存时间、提高通信可靠性等起决定性作用^[3]. 而分簇路由技术能显著降低数据延迟,提高带宽利用率,有效延长网络生命周期等,相比之下具有更好的扩展性和适用性,得到了国内外学者的广泛研究^[4]. 文献[5]提出的 LEACH 算法,是首次被提出的均匀分簇算法,通过按轮的方式进行簇头的周期性轮换,将能耗平均分配到了每个节点,均衡了网络能耗,延长了网络生存周期. 文献[6]提出了一种基于 LEACH 改进的分簇路由,该算法将节点与汇聚节点间的距离和节点剩余能量相结合,提出一条单跳与多跳相结合的传输方式. 文献[7]提出的 EE-UC 算法,在随机选出的候选簇头中,根据剩余能量和非均匀竞争半径构造大小不等的簇,使靠近汇聚节点簇的规模小于远离汇聚点的簇. 文献[8]提出了一种能量异构的非均匀分布式路由算法 DRAEH,该算法采用 3 级能量架构,采用双级簇首方式,簇首选举时结合了固定选举和随机选举二种方式,并在簇间构造多跳路由树进行数据传输.

虽然上述文献取得了一些进展,但是仍存在些不足:(1)都是基于局部的随机竞选,且参数选取复杂,需要不断地广播信息,增加了算法的复杂性和控制开销;(2)针对链状拓扑应用,上述路由很难保证簇间路由由数据传输的能耗最优. 因此本文针对链状结构拓扑这一应用,提出了一种能量均衡的非均匀路由算法,实验结果表明,该算法能够有效地均衡节点能耗,延长网络生命周期.

2 相关模型

2.1 网络模型

由于不同类型传感器节点的能耗差异,以及传

感器节点配置始能量的差异,因此本文设计的是一种层次型异构无线传感器网络. 其链状结构拓扑如图 1 所示.

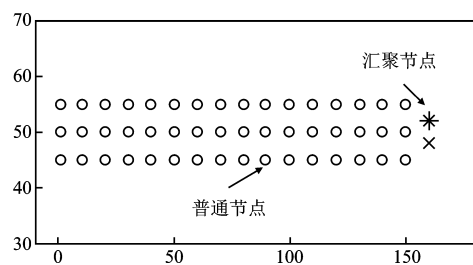


图 1 链状结构拓扑图

各个节点的性质设置如下:

- (1) 每个节点具有唯一的 ID, 且布置后不再移动;
- (2) 每个节点都可以根据接收到的信号强度(RSSI)估算自己与发送者的距离, 并可以根据距离调整其发射功率;
- (3) 节点具有不同的初始能量, 但具有相同的通信和数据处理能力, 且只允许簇头采用数据融合技术.

2.2 能耗模型

本文使用文献[5]提供的能耗模型, 并分别给出了计算发送或接收比特数为 k , 距离为 d 数据包所消耗的能量 $E_{Tx}(k, d)$ 和 $E_{Rx}(k, d)$, 如式(1)和(2)所示:

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} E_{elec} \times k + \epsilon_{fs} \times k \times d^2, & d < d_0 \\ E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k) = k \times E_{elec} \quad (2)$$

式中, E_{elec} 为节点发送或接收每比特数据所消耗的能量; ϵ_{fs} 和 ϵ_{amp} 分别为两种不同信道传播模型下的功率放大电路能耗系数; $d_0 = 87$ m.

2.3 数据融合模型

分簇路由协议的基本思想之一是采用数据融合技术减少传输的数据量, 以节约网络能量^[9-10]. 由于簇间数据的差异性较大, 仿真中不考虑簇间的数据融合, 同时为了适当增加冗余以提高可靠性, 本文设置簇头的融合率为 70%, 簇头融合 k 比特数据并转发到距离为 d 的节点所消耗能量如(3)所示:

$$E_{Fu}(k, d) = E_{DA} \times k + 0.3 \times E_{Tx}(k, d) \quad (3)$$

3 算法描述

本文所提算法主要分为初始化、簇首选举、节点成簇、以及数据传输 4 个阶段. 在初始化阶段, 主要

负责数据的收集,为接下来的工作做准备;在簇首选举阶段,提出了基于定时器的全局竞选方式;在节点成簇阶段,详细的阐述了不同节点成簇细节;在数据传输阶段,簇首以节点的相对剩余能量和能量开销指标为参数构建基于最小生成树的最优传输路径.

3.1 初始化

3.1.1 网络初始化阶段

汇聚节点广播“hello”消息唤醒所有布置的节点,并同步所有节点时钟,节点在收到信号后,根据信号的强度(RSSI)计算出与汇聚节点的大概距离并保存,这不仅有助于节点向汇聚节点传输数据时选择合适的发送功率,而且它还是算法后续工作的必需信息之一;每个节点根据与汇聚节点的距离,由式(4)计算出自己的竞争半径并保存,有助于后面非均匀半径簇的构建.

$$R_i = \left(1 - c \times \frac{d_{\max} - d(i, DS)}{d_{\max} - d_{\min}}\right) \times R_0 \tag{4}$$

式中, R_i 为节点 i 的竞争半径; $d_{\max}$ 为节点到基站的最大距离; $d_{\min}$ 为节点到基站的最小距离; $d(i, DS)$ 为节点 i 到基站的距离; R_0 为预先设置的最佳半径; c 取值为 $0 \sim 1$, 用于控制 R_i 大小的参数.

3.1.2 信息更新阶段

在每轮工作开始之前,每个节点需要保存(更新)一张邻居节点信息表,用于以构建基于最小生成树的最优传输路径,内容如表 1 所示.

表 1 邻居节点信息表内容

节点标示	相对剩余能量	与汇聚节点之间距离
ID	$\frac{E_{res}}{E_0}$	$d(i, DS)$

每个节点根据竞争半径 R_i 广播一次 Comp_MSG 消息,内容包括自己的 ID,相对剩余能量以及与汇聚节点之间的距离,当其他节点在收到此节点广播的信息后,将信息保存于自己的邻居节点信息表中.

3.2 簇首选举

基于传统路由算法在簇首选举阶段,存在“局部竞选且开销大,参数多且复杂,不适用于异构网络”等缺点,本文提出一种基于定时器的全局竞选方案,竞选开销小,且参数选择精要、简单,主要考虑了节点的相对剩余能量和与汇聚节点的距离,能够适用于异构网络,实现最优簇头的选举.

(1)在选举开始时,每个节点清零自身定时器,并设置簇头竞争时间,其值由式(5)计算得到.

$$t(i) =$$

$$T \times \left[\omega \times \left(1 - \frac{E_{res}(i)}{E_0(i)}\right) + (1 - \omega) \times \frac{d(i, DS)}{d_{\max}} \right] \tag{5}$$

式中, $E_{res}(i)$ 和 $E_0(i)$ 分别为节点 i 的剩余能量和初始能量; $d(i, DS)$ 为节点 i 到汇聚节点的距离; $d_{\max}$ 为节点到汇聚节点的最大距离; ω 为选举因素所占权重; T 是预先设定的簇首竞争时间.

不同参数监测类型的传感节点具有不同的初始能量和能耗速度,如果仅仅以节点剩余能量选择簇首,会使那些表面剩余能量多,但消耗过快的节点过早死亡.因此在式(5)引入了相对剩余能量因子 $1 - \frac{E_{res}(i)}{E_0(i)}$,其值不仅反映了节点当前的剩余能量情况,也间接反映了节点能耗速度.在簇首竞选中,如果值 $\frac{E_{res}(i)}{E_0(i)}$ 越大,说明节点在前面周期中相对能耗速度越小, $1 - \frac{E_{res}(i)}{E_0(i)}$ 的值也就越小,其簇首竞争时间 $t(i)$ 越小,成为簇首的概率就越大.

此外,由式(6)分析的一簇首融合 m 成员节点,并发送数据到汇聚节点的能耗可以看出,簇首的能耗与至汇聚节点的距离息息相关,如果簇头距离汇聚节点较远,那么在簇首与汇聚节点的多跳通信过程中,会消耗大量的能量.因此本文在簇首选举阶段考虑了节点与汇聚节点的距离因子 $\frac{d(i, DS)}{d_{\max}}$,由式(5)可以看出,当节点距离汇聚节点较近时, $\frac{d(i, DS)}{d_{\max}}$ 的值就小,其对应的簇首竞争时间 $t(i)$ 越小,成为簇首的概率就大.

$$E_{CH} = m \times E_{R_x} + (m + 1) \times E_{F_u} + 0.4 \times (m + 1) \times (E_{elec} \times k + \epsilon_{fs} \times d^2(i, DS)) \tag{6}$$

(2)各节点启动定时器开始竞选簇首,当节点 i 定时时间到时,以 R_i 为半径广播 HEAD_MSG 消息,宣布成功竞选为簇首,内容包括自身 ID 和与汇聚节点之间的距离.当其它节点收到节点 i 广播的信息后,立即清零定时器退出竞选,并保存簇首信息表如表 2 所示,其余节点重复上述竞选方式,直至选举完成.由于在选举中考虑了节点与汇聚节点的距离,因此该选举方法会以汇聚节点为中心,逐次由里及外选举最优簇首.

表 2 节点保存的簇首信息表

簇首标示	与汇聚节点之间距离
ID	$d(i, DS)$

3.2 节点成簇

根据各节点保存的簇首信息表,可将节点分为两类,因此节点成簇可分为两种情况:

(1)节点保存的簇首信息表中只有一个簇首信

息,则节点直接成为这个簇首的成员即可;

(2)节点保存的簇首信息表中存在多个簇首信息,在这种情况下,节点首先比较距离哪个簇首最近,并选择加入距离自己最近的簇首;若距离多个簇首的距离相等,为了减少距离汇聚节点较近节点的簇内消耗,选择加入通信半径更大的簇.

3.3 基于最小生成树多跳路由构建

由于在链状结构拓扑应用中,由于簇间仅存一条路径,无法保证路径最优;且采用簇间多跳,需簇头广播全局消息,增加能量开销;由于簇内消耗,消耗了簇首大量能量,再使簇首转发数据,会加重节点间的能量差异.

因此本文以簇首为源节点,构建基于最小生成树的最优多跳路由路径,当有簇头(节点)发送或转发数据包到汇聚节点时,簇首(节点)根据式(7)计算到各个邻居节点之间的转发代价,并从中选则代价最小的作为中继节点,直至节点与汇聚节点满足一跳的距离.

$$Cost(i) = \alpha \times \frac{d^2(i,j) + d^2(j,DS)}{d^2(i,DS)} + (1 - \alpha) \times \frac{E_0(j)}{E_{res}(j)}$$
 (7)

在选择中继转发节点时,如果仅考虑节点的剩余能量而忽略转发过程中的能耗,会导致网络的整体能量利用率下降.因此本文分析了节点一次中继转发的能耗,为简化问题分析,假设簇首(节点) i 选择邻居节点 j 为中继节点,转发 k 比特数据包到汇聚节点,且采用自由空间模型,得出整个过程消耗的能量如式(8)所示:

$$\begin{aligned} E_{2-hop} &= E_{Tx}(k,d(i,j)) + E_{Rr}(k) + E_{Tx}(k,d(j,DS)) \\ &= k(E_{elec} + \epsilon_{fs}d^2(i,j)) + kE_{elec} + k(E_{elec} + \epsilon_{fs}d^2(j,DS)) \\ &= 3kE_{elec} + k\epsilon_{fs}(d^2(i,j) + d^2(j,DS)) \end{aligned}$$
 (8)

由式(8)可以看出,中继转发过程中的能耗与 $d^2(i,j) + d^2(j,DS)$ 有关,因此在式(7)中引入了能量开销指标 $\frac{d^2(i,j) + d^2(j,DS)}{d^2(i,DS)}$,以减小中继转发的能耗,提高能力利用率,同时又考虑了节点的相对剩余能量 $\frac{E_{res}(i)}{E_0(i)}$,以选择最优转发节点.

4 仿真实验与结果分析

为了证明本文算法的性能,我们在相同条件下用 MATLAB 分别对 LEACH、DEEC、EEUC 和本文算法进行了仿真,并根据网络生存周期、网络总剩余能量、能耗均衡性进行对比.仿真参数设置如表 3 所示.

表 3 实验仿真参数

参数	取值
节点数	50
数据包大小 k 大小	4000 bit
E_0	0.5 J
ϵ_{amp}	0.0013pJ/(bit · m ²)
E_{DA}	5 nJ/bit
E_{else}	5 nJ/bit
R_0	60 m
$\omega = \alpha$	0.5

4.1 簇头数目和分布

一个稳定的分簇路由算法应该生成数目比较一致的簇首而且分布要均匀整个网络.本文从每种算法的仿真中随机选出 100 轮,统计所选出簇首数目情况如图 2 所示,其中随机一轮仿真后的拓扑结果如图 3 所示.

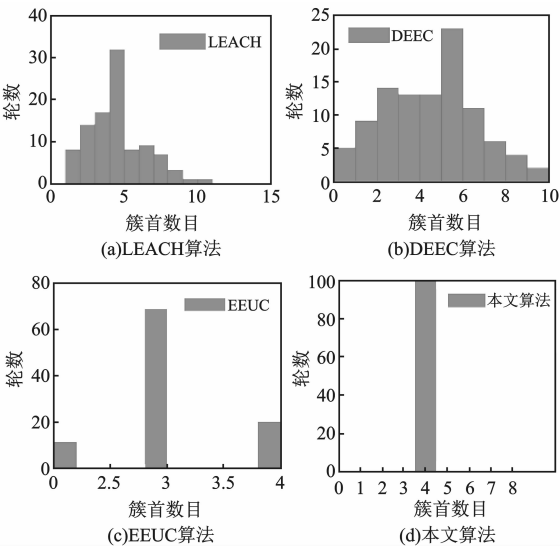


图 2 各种算法生成的簇首数目统计图

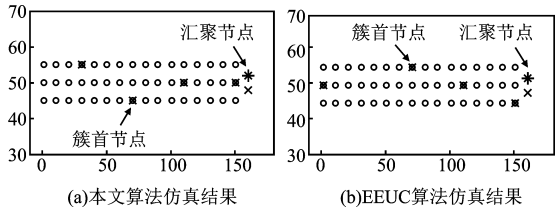


图 3 随机一轮下两种算法仿真后的拓扑结果图

由图 2 可见,LEACH 和 DEEC 算法所选簇首数目波动比较大,这是由于采取随机数与阈值的簇首选取机制所导致的;EEUC 算法虽然采用局部的非均匀竞争机制,但候选簇首仍然是随机选取,仍会导致簇首数目的不稳定且不能覆盖整个网络;而本文算法是基于全局网络的选举方式,并且考虑到了节点与汇聚节点的距离,因此簇首数目较稳定.

由图 3 可见,对比在随机一轮中本文算法和

EEUC 算法的仿真结果,本文算法在簇首选举的分布上更为均匀,且簇首距离汇聚节点更近,更有利于降低网络的能量消耗。

4.2 网络生存周期和能耗均衡性

图 4 为本文仿真下的每种算法网络中死亡节点数随轮数的变化情况,从图 4 可以看出本文算法首个节点死亡的时间比 LEACH、DEEC 以及 EEUC 协议都滞后,本文算法首个节点死亡的时间在 1 800 轮左右,比 EEUC 算法提高了 400 轮,比 LEACH 和 DEEC 算法提高了 1 000 多轮;从能耗均衡性方面来看,本文算法 90% 节点死亡的时间与首个节点死亡的时间相差 100 轮左右,而 EEUC 在 300 轮左右,LEEACH 和 DEEC 则在 1 500 轮左右,由此可以看出本文算法节点的能耗更为均衡。

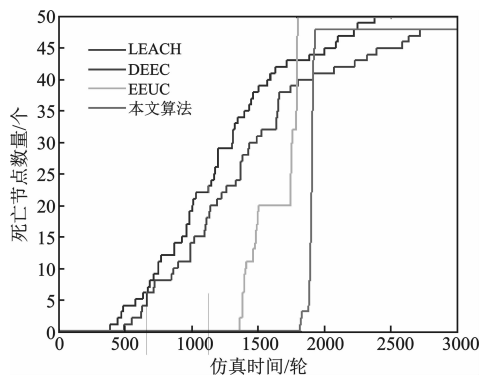


图 4 死亡节点数随仿真时间变化对比图

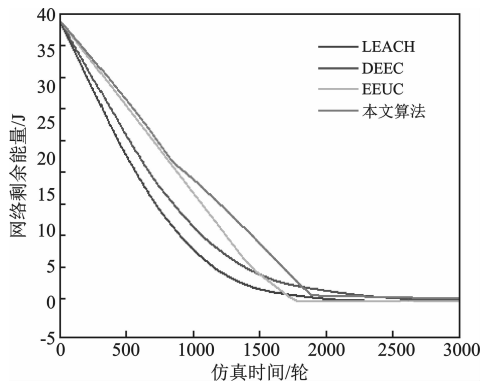


图 5 网络剩余总能量随仿真时间变化对比图

4.3 网络剩余总能量

图 5 为本文仿真下每种算法中网络剩余总能量随仿真时间的变化情况,从图 5 中可以看出,这 4 种算法网络能耗各不相同,本文算法的网络能耗比其他三种算法更小,网络剩余总能量更大,这是由于本文算法在簇首选举中考虑了节点与汇聚节点的距离,而且并不是采用簇间多跳,使得转发路径更优;而 LEACH 和 DEEC 算法的网络能耗相比与 EE-

UC 消耗更大,是由于这两种算法采用与汇聚节点单跳的通信方式,消耗大量的能量。

5 结束语

针对链状结构拓扑这一应用场景,本文有效的设计出一种能耗均衡的非均匀路由算法。为了减少传统路由在簇首选举阶段的广播控制消耗,提出了一种基于定时器的非均匀半径簇首选举方式,在时间的设置上综合考虑了节点的相对剩余能量和与汇聚节点的距离,实现了最优簇首的选举,减少了网络能量开销;在多跳路由构建阶段,与以往采用簇间路由传输不同,本文利用已知的邻居节点信息,以相对剩余能量和能量开销指标为参数构建基于最小生成树的最优多跳路径,避免了簇首转发数据的能耗,进一步减少了各节点能量的差异,实现能量均衡消耗。仿真结果表明,本文算法在生命周期和能耗均衡方面都较优于 LEACH、DEEC 和 EEUC 路由。

参考文献:

- [1] 杜永文,冯珂,练云翔. 无线传感器节点能量自主预测算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(12): 113-116.
- [2] 李丽,降爱莲. 基于蚁群优化的无线传感器网络数据融合算法[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(6): 68-72.
- [3] 黄利晓,王晖,袁永永,等. 基于能量均衡高效 WSN 的 LEACH 协议改进算法[J]. 通信学报, 2017(s2): 164-169.
- [4] 石美红,王臻跃,姜寿山,等. 基于优化成簇多跳的 LEACH 协议改进[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(9): 122-126.
- [5] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless micro sensor networks[C]//Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [6] 李亚男,徐夫田,陈金鑫. 基于 LEACH 的 WSNs 分簇优化策略[J]. 传感技术学报, 2014, 27(5): 670-674.
- [7] 李成法,陈贵海,叶懋,等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.
- [8] 李东林,韦素媛. 基于能量异构的 WSN 分布式路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(10): 36-41.

(下转第 45 页)

参考文献:

[1]

高野. 对射击弹壳上几种痕迹特征变化的分析[J]. 辽宁警专学报,2003,22(6):36-38.

[2]

韩毅,张双喜,谢昊原. 一种枪弹痕迹自动对比算法[J]. 计算机仿真,2013,30(3):30-33.

[3]

Gupta Y, Gupta M, Kumar A, et al. A genetic algorithm-based approach to cell composition and layout design problems [J]. Transportation Research, 1996, 34(2):447-482.

[4]

Yun X F,Dai X S,Zhao J Y,et al. On a novel multi-swarm fruit fly optimization algorithm and its application[J]. Applied Mathematics and Computation,2014, 233:260-271.

[5]

赵佳鑫,高岳林,陈群林. 一种求解非线性规划问题的粒子群算法[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2017, 38(2):15-22.

[6]

梅海涛,华继学,王毅. 求解非线性规划问题的改进直觉模糊遗传算法[J]. 计算机科学,2016,43(9): 250-254.

[7]

朱志同,赵阳,李炜,等. 基于改进果蝇算法求解混合整数非线性规划问题[J]. 计算机应用与软件,2017, 34(6):262-308.

[8]

曹岩枫,徐诚. 基于果蝇算法优化广义回归神经网络的机枪枪管初速衰减建模与预测[J]. 兵工学报, 2017,38(1):1-8.

[9]

Specht D F. A general regression neural network [J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1991,2(6): 568-576.

作者简介:

朱富占 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为智能计算. E-mail:2860603443@qq.com.

邹海 男,(1969-),博士,副教授. 研究方向为智能计算和数据挖掘.

张馨 女,(1994-),硕士研究生. 研究方向为智能计算与计算机视觉.

(上接第 40 页)

[9]

李建坡,董子奇. 基于能量迭代的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J]. 计算机应用研究,2017,34(3):824-827.

[10]

徐晶晶,张欣慧,许必宵,等. 无线传感器网络分簇算法综述[J]. 计算机科学,2017,44(2):31-37.

作者简介:

刘小涛 男,(1989-),硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络路由协议. E-mail:1044951087@qq.com.

陈珍萍 女,(1981-),博士,副教授,研究生导师. 研究方向为物联网技术和时间同步.

黄友锐 男,(1971-),博士,教授,博士生导师. 研究方向为智能控制、矿山物联网、复杂网络、无线传感器网络等.