

# 一种改进的簇链结合分层路由算法

程载和<sup>1,2</sup>, 刘以安<sup>1</sup>

(1. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 无锡职业技术学院, 江苏 无锡 214121)

**摘要:**针对大规模带状无线传感器网络数据采集这一应用模型存在的传送实时数据延时长、传送大量密集数据能耗大的问题,在 LEACH 算法和 PEGASIS 算法的基础上,提出了一种分层链式路由算法(HCRP)。该算法针对带状传感网络的特点,在聚簇的同时利用 PEGASIS 算法建立簇内链和簇外链,把并行数据传输融合和串行数据传输融合结合起来。仿真结果表明:HCRP 算法较 PEGASIS 算法有效减少了传输实时数据的延时,增加了数据传输能耗的均衡性,较 LEACH 算法有效改善了数据传输能耗有效性,更适用于大规模密集部署的带状无线传感网。

**关键词:**带状无线传感器网络;实时数据;聚簇;分层链式路由算法;能耗有效性

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)05-0097-04

## An Improved Hierarchical Routing Protocol Based on Cluster and Chain

CHENG Zai-he<sup>1,2</sup>, LIU Yi-an<sup>1</sup>

(1. Network Engineering College of Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121, China)

**Abstract:** Routing protocol in a large scale ribbon sensor network is researched. Long latency of data transmitting and high energy consumption are main problems of the large-scale wireless sensor networks which is used for gathering data real-time. A hierarchical chaining routing protocol (HCRP) is proposed by taking advantages of both LEACH and PEGASIS algorithms. The new algorithm has two layer chains, the first chain is linked by nodes in cluster and the node with max (E) is chosen as node agent to transfer information to cluster head, the second chain is linked by cluster heads and the cluster head with max (E/d<sup>2</sup>) is chosen as cluster agent to transfer information to the base sink. Simulation results show that HCRP protocol reduces the time delay of real-time data transmitting effectively. Besides, it also provides a good energy efficiency for the networks. The HCRP protocol is suitable for the large-scale wireless ribbon sensor networks.

**Key words:** wireless ribbon sensor networks; data real-time; cluster; HCRP; energy efficiency

### 0 引言

无线传感器网络集合了无线通信技术、微型传感器技术和计算机网络技术等,首先在被监测区域合理部署无线传感节点,其次对采集到的检测信息,通过无线传感节点自组织形成的网络,进行预处理和传输<sup>[1,2]</sup>。无线传感节点能耗一般采用电池供电模式,传感节点在实际工作现场布设之后,频繁重新补充能量增加了维护和运营的成本,也成为无线传感网络大规模应用的瓶颈之一。如何高效利用节点现有能源,减少能耗,成为无线传感网络研究的热点。考虑到邻

近区域节点采集的被监测信息比较接近,所以一般的做法并不是由每个节点通过网络把信息传输给汇聚节点,而是按照区域划分成簇,由簇头通过簇头网络以多跳的方式实现信息传递。这种做法的弊端是距离远的簇头转发信息机会少,能量消耗相对较少,而靠近汇聚点的簇头转发数据量大,使用频率高,能量消耗大,生命周期短,降低了网络的存活周期,也就是出现热区问题。对于周界入侵探测、桥梁信息预警、输电线路监测等这一类传感器布局形成长而窄的带状特性的无线传感网络子集,使得能耗不均衡问题更加突出,严重影响网络生命周期。因此如何减少能量消耗,尽量延长整个网络的生命周期是路由算法设计时首要考虑的问题。前面的研究中,已经有多种路由算法被提出,其中层次路由算法与平面路由算法相比具有更好的能量有效性和扩展性,成为无线传感器网络路由算法的主要

收稿日期:2011-09-28;修回日期:2011-12-29

基金项目:中央专项资金资助项目(财教[2011]202号)

作者简介:程载和(1977-),男,讲师,硕士,研究方向为无线传感网;刘以安,教授,博士,研究方向为数据挖掘、数据融合、雷达对抗。

研究方向之一。LEACH<sup>[3]</sup>是最早的层次路由算法,很多路由算法都是从 LEACH 基础上改进而来的,如 LEACH-EA<sup>[4]</sup>、PEGASIS<sup>[4]</sup>等。

## 1 相关工作

### 1.1 无线能量模型

在无线传输中,发射和接收 1bit 数据消耗  $E_{elec} = 50\text{nJ/bit}$  的能量,传输 1bit 数据  $1\text{m}^2$  消耗发射放大器的能量为  $\varepsilon_f = 100\text{pJ/bit/m}^2$ ,融合 1bit 数据的能耗为  $5\text{nJ/bit}$ 。发射功率的衰减随着传输距离的增大而呈指数衰减,传感节点发射方和接收方之间的距离设为  $d, d_0$  为设定值,当  $d$  不大于  $d_0$  时,发射能耗与  $d^2$  成正比<sup>[5]</sup>;当  $d$  大于  $d_0$  时,发射能耗与  $d^4$  成正比,具体数据发送、接收和融合所需消耗功率如公式(1)~(3)所示。

数据发送:

$$E_T(k, d) = \begin{cases} E_{elec} * k + \varepsilon_f * k * d^2, & d \leq d_0 \\ E_{elec} * k + \varepsilon_f * k * d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

数据接收:

$$E_R(k) = E_{elec} * k \quad (2)$$

数据融合:

$$E_C(k) = E_{gather} * k \quad (3)$$

### 1.2 LEACH 路由算法

LEACH 路由算法是低功耗自适应聚簇分层路由协议 (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)。LEACH 路由算法的核心思想是循环轮转调用算法,每轮随机选择簇头,把簇内数据融合后再传输,减少传输能量消耗,将网络能量负载平均分配给每个节点,从而提高网络生命周期。该算法实现步骤如下:

(1)簇头选择:每轮簇头选择时间,所有节点产生 0~1 之间的随机数,如果随机数小于设定值  $T(n)$ ,该节点向周围节点发送自身为簇头的信息,其它节点对于接收到的第一个簇头信息认定为本轮自己所在簇的簇头,从而屏蔽其它簇头发来的信息。 $T(n)$  设定公式如(4)所示。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(\text{rmod}(1/p))} & n \in G \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中,  $p$  表示簇头个数与所有节点比;  $r$  表示算法运行的轮数;  $G$  是最近  $1/p$  轮中从未当过簇头的节点集合。 $T(n)$  设定公式表明:本轮簇头在紧接下来的  $1/p$  轮循环中不能再成为簇头,增大其它节点当簇头的几率,从而均衡网络节点能量消耗。LEACH-EA 算法修改了阈值函数<sup>[6]</sup>,如下式所示。其簇头选择综合考虑了节点的当前能量和每轮结束后的节点平均能量,较之 LEACH 算法能量使用相对均衡。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p(\text{rmod}(1/p))} * \frac{E_{current}}{E_{aver}} & n \in G \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

(2)数据传输:簇内数据都采用 TDMA<sup>[7]</sup>算法直接发送数据给簇头,簇头接收到所有簇内数据后,进行数据融合,直接把处理后的信息发送给基站。

(3)上述算法缺点:

①周期性重选簇头平衡簇头与簇成员节点之间能量消耗的算法,和以节点的剩余能量为依据选择簇头的方法,都难以解决热区问题。因其只在网络局部比较节点剩余能量,无法从整体上协调节点能量消耗。

②簇内节点直接把数据传输给簇头,由簇头完成所有节点信息的接收和融合任务,簇头消耗能量较大;簇头直接与基站通信,簇头能量消耗快,容易造成网络分割,不适合在大规模的无线传感器网络中应用。

③每轮循环都要重新构造簇,能量开销大。

### 1.3 PEGASIS 路由算法

PEGASIS 是 Raghavendra 针对 LEACH 直接与基站通信耗能过快,提出的低能耗链式路由算法,算法基本思想是:从距离基站最远的节点开始构造链,每个节点都找到距离最近的邻居节点构成链,使用这种贪婪算法最终把所有节点连接成一条链;在每轮通信中,只有一个节点当选为代理节点,代理节点产生一个令牌<sup>[8]</sup>,控制数据从链的两端沿链向代理方向传输融合数据,代理把最终融合的数据直接传送给基站。当链中有节点死亡后,链就重构。算法最大的优点就是节省能量。

缺点:

(1)链太长,一个节点失效,导致本轮可能已完成的大量传输和融合能量损失;

(2)整个网络一条链,逐一融合传输,时延太长。

结合 PEGASIS 路由算法和 LEACH 路由算法的能耗设计的优点<sup>[9,10]</sup>,设计一种分层链式路由算法 (HCRP)。

## 2 HCRP 算法

### 2.1 算法特点

(1)无线传感网络分为四个层次:第一层簇内节点,第二层簇代理,第三层簇头,第四层簇头代理;

(2)建立二级数据传输链,簇内建链,簇头之间建链;

(3)设定二级代理,簇代理负责把融合后的簇内数据传输给簇头,簇头代理负责把融合后的簇间数据传递给基站;

(4)数据传输根据数据所在的层次,沿链传输。

### 2.2 HCRP 算法描述

HCRP 算法流程图如图 1 所示,下面分别从簇头

选择、簇头和簇头代理轮换、簇代理的选择和轮换三个方面详细描述。

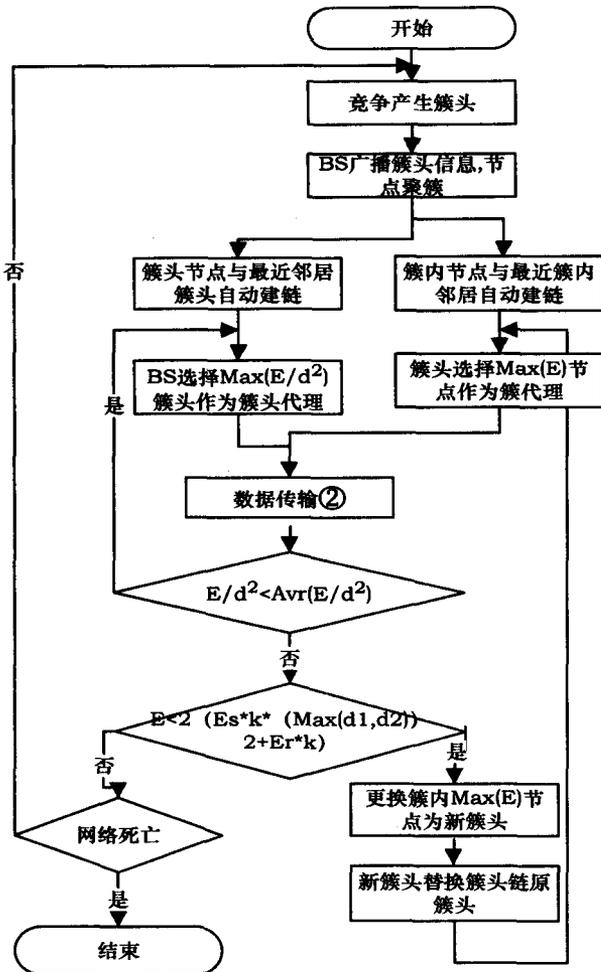


图 1 PLP 算法流程图

(1) 簇头选择：基站按照预先确定的大小把带状传感网划分成为一个个长方形区域，基站把区域信息广播出去，节点把自身 ID、位置和能量信息和区域信息发送给基站，基站选择区域节点中  $\text{Max}(E)$  信息作为该区域的簇头，从而确定所有区域的簇头，并计算各个簇头的  $E/d^2$ ，选择  $\text{Max}(E/d^2)$  簇头作为簇头代理，都确定后，基站把簇头代理和簇头 ID 及其位置信息广播出去。

①簇间建链：簇头接收广播信息后，寻找离自身最近的簇头作为自己的邻居，开始建链；

②簇内建链：簇内节点根据自己所在区域选择簇头加入，并把自身的 ID、位置、能量信息发送给簇头，簇头选择  $\text{Max}(E)$  作为簇代理，并广播簇内节点信息。簇内节点接收广播信息后，寻找离自身最近的节点作为自己的邻居，开始建链；

③数据处理：簇代理向链两端发出数据收集请求，采用令牌控制数据从两端沿着链传送到代理；链数据传输过程中，中间节点会不断将从其它节点接收到的数据与自身数据融合，簇代理融合完信息后，发送给簇

首；簇首沿着簇首链将信息传送给簇首代理节点，簇首数据传输过程中，也是边传输边融合，最后发送给基站，如图 2 所示。

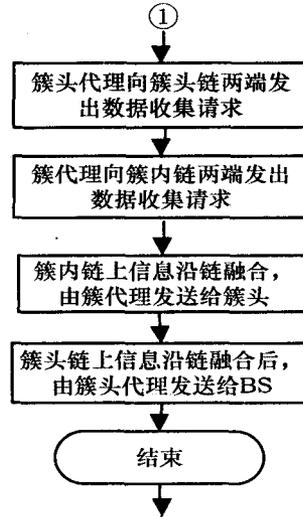


图 2 数据处理

(2) 簇头轮换和簇头代理的轮换：

①  $E_{ri} \leq 2(E_s * k * (\text{Max}(d1, d2))^2 + E_r * k)$  为避免网络割断，此时的节点不能够再作为路由节点，只能作为终端节点，必须在簇内更换，更换为目前簇内  $\text{Max}(E)$  节点，然后通知链邻居和基站，簇内重新建链；

②每轮结束基站都会做新的比较，当簇头代理的  $E/d^2 < \text{Avr}(E/d^2)$  时，簇头代理需要重新确定  $\text{Max}(E/d^2)$  为新的簇头代理；

簇头成链：在链中选择  $E/d^2$  最大的簇头作为二级簇头代理节点与基站直接通信，其它数据节点沿链传输，边传输边融合，把数据传送给簇头代理。

(3) 簇代理的选择和轮换：簇头选择簇内能量最高的节点作为簇代理。

### 2.3 算法分析

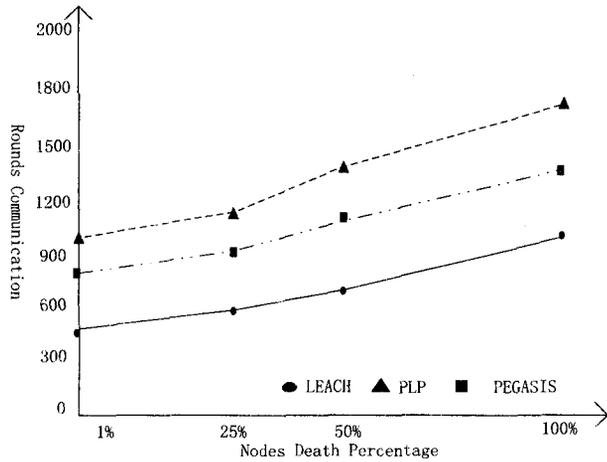
(1) 把串行传输链分割成节点数量相对一致的多个簇 (4~6 个)，多个簇内数据并行传输，簇间数据串行传输，延时大大降低；

(2) 簇内节点能量消耗降低并且更加均衡：数据不用从节点直接发送给簇头，而是发送给最近邻居，增加的数据融合能量消耗远远低于降低传输距离带来的能量消耗减少量；

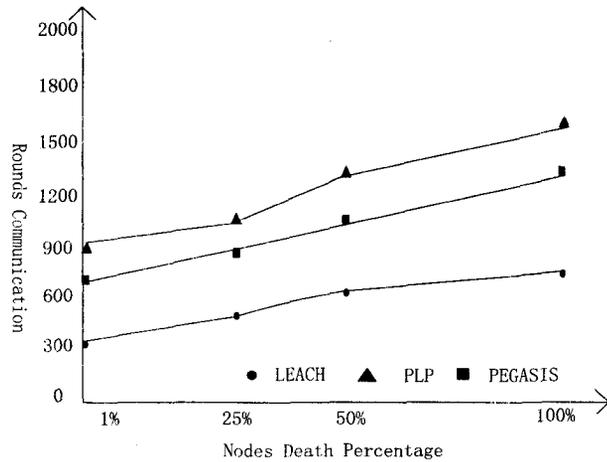
(3) 簇头能量消耗大大降低：仅仅相当于独立于簇之上的路由节点，用来接收簇代理以及链上前一邻居簇头发来的数据，并把数据转发给链上下一邻居簇头；与传统算法相比簇头不再直接接收簇内多个节点的数据、不用融合簇内所有数据、不需要直接发送数据给基站，这些改进都大大减少了簇头的能耗，增加了能耗的均衡性。

### 3 仿真结果与分析

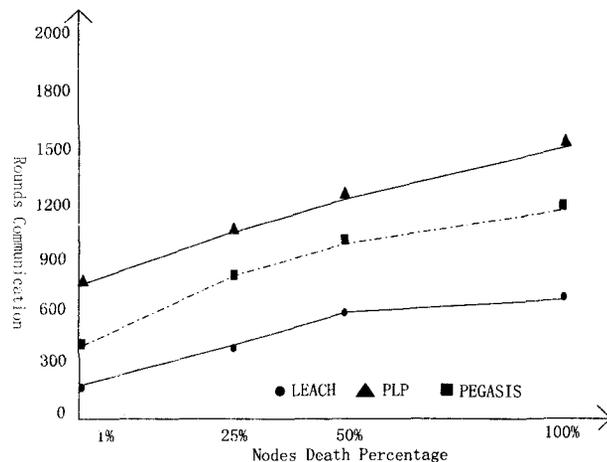
文中算法仿真实验采用的是基于离散事件的无线电通信网络信道模拟软件 OMNeT++<sup>[11]</sup>。文中 HCRP 算法是在 LEACH 和 PEGASIS 算法基础上发展而来的,所以仿真实验和比较主要在这三者之间展开。选择带状传感网设置 100 个传感器节点分别覆盖区域为 30m \* 600m、30m \* 800m 和 30m \* 1000m,能量模型采



(a) 30m \* 600m



(b) 30m \* 800m



(c) 30m \* 1000m

图 3 传输轮数与节点存活率关系曲线

用 1.1 节所述能量模型,从传输轮数和节点存活率之间的关系进行性能对比,如图 3 所示。

从图 3 仿真结果可见,循环轮数与节点存活率关系曲线大体趋势相同,都是 HCRP 算法明显优于 LEACH 路由算法和 PEGASIS 路由算法,节点存活率高,网络生命周期长。分析其原因主要是 HCRP 算法进一步改善了簇头选择方式,采用隔轮重组模式,减少了簇头选择的总时值,以链中剩余能量为主要依据合理选择簇头,在簇头骨干网络以多跳方式传输数据,使得负载网络能量消耗更趋均衡,网络分割可能性大大降低,网络生命周期延长,较好地解决了节点能耗高效利用的问题<sup>[12]</sup>。

### 4 结束语

在分簇路由算法中,簇首负责管理簇内的成员,收集和融合簇内的数据以及转发簇间数据。大量的任务由簇首处理将导致簇首耗费过多的能量,从而影响网络的生存时间。

文中提出的分层链式路由算法(HCRP),通过建立簇内和簇外二级链,设定簇代理完成簇内数据收集和融合任务,设定簇头代理负责收集簇外链上融合和传输的数据,并发送给汇聚点(Sink),簇头负责簇外数据和簇内数据的路由功能。仿真结果表明,改进后的算法进一步降低了网络中的能量消耗,有效延长了网络生命周期。

### 参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Russo F A,Knockeart R P. Automated data acquisition with an optical code reader[J]. Beedix Technical,1972(5):48-52.
- [3] Heinzelman W R,Chandrakasan A,Balakrishnan H. Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proc of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. [s. l.]:IEEE Computer Society,2000:30-47.
- [4] Lindsey S,Raghvendra C S. PEGASIS Power-Efficient Gathering in Sensor Information System[J]. IEEE Aerospace Conference Proceedings,2002,3(3):1125-1130.
- [5] Heinzelman W. Application-specific Protocol Architectures for Wireless Networks[D]. Cambridge, USA:Massachusetts Institute of Technology,2000.
- [6] 沈波,张世永,钟亦平.无线传感器网络分簇路由协议[J].软件学报,2006,17(7):1588-1600.
- [7] 庄雄,杨永明,丁唯,等.一种消除无线传感器网络簇间干扰的 TDMA 协议及实现[J].传感技术学报,2009,22(8):1186-1192.

找到全局最大值,只是对于找到的局部最大值的个数差别很大。文中算法找到的峰值个数明显比 CSA 算法多出很多,几乎是它的近 5 倍;平均运行时间比 CSA 算法慢了不少,几乎是它的一倍;两种算法的平均迭代次数一样都是 100 次,结果如图 3 所示。

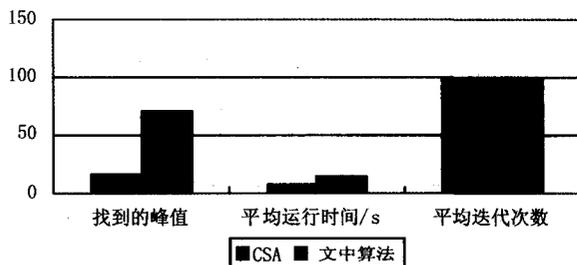


图 3 2 种算法对 Multi 函数测试的对比结果

Schafer 函数  $g_2(x, y)$  有无穷个局部极大值点,其中只有一个全局极大值点,对比结果见图 4。显然,文中算法找到的峰值个数也比 CSA 多了不少,几乎是它的 7 倍;平均运行时间比 CSA 算法快了不少,几乎是它的近 7 倍;两种算法的平均迭代次数同样都是 100 次。

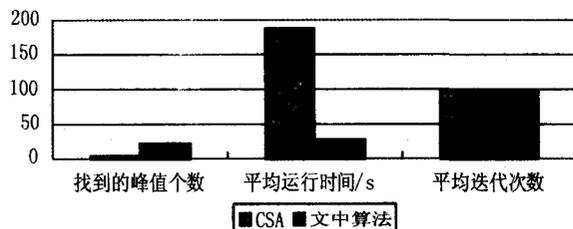


图 4 2 种算法对 Schaffer 函数测试的对比结果

文中算法在仿真实验中每次都能找到全局极大值点,找到的峰值个数都比 DeCastro 克隆选择算法多且找到相同峰值数所需的时间比 DeCastro 克隆选择算法短,而基本的 DeCastro 克隆选择算法并不能每次都找到全局极大值点,且具有一定的随机性。

#### 4 结束语

文中在分析 DeCastro 克隆选择算法存在的各种问题(种群规模的大小的确定依赖于人为经验、种群训

练的时间比较长、多峰搜索能力相对较弱)的基础上,提出一种新的改进的克隆选择算法。该算法使得种群规模大小可任意调节,不用依赖人为的经验,从而更好地更快速地实现局部和全局的搜索,具有多样性、训练时间短、多峰搜索能力强等优点。

#### 参考文献:

- [1] 周大为,吴耿锋,胡珉.改进的可乐选择算法 ICSA[J].计算机工程与设计,2009,30(11):2741-2744.
- [2] 焦李成,杜海峰,刘芳.免疫优化计算学习与识别[M].北京:科学出版社,2006.
- [3] 原霞飞,刘希玉,刘凤鸣.人工免疫系统研究[J].网络安全技术与应用,2010(6):71-73.
- [4] 孙宁.人工免疫优化算法及其应用研究[D].上海:中国科学院上海冶金研究所,2006.
- [5] Kim J, Bentley P J. Towards an artificial immune system for network intrusion detection: an investigation of clonal selection with a negative selection operator [C]//Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation. [s. l.]: [s. n.], 2001: 1244-1252.
- [6] Du H, Jiao L, Wang S. Clonal operator and antibody clone algorithms [C]//Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics. [s. l.]: [s. n.], 2002: 506-510.
- [7] 廖章珍,陈强.人工免疫系统的基本理论及其应用[J].自动化与仪器仪表,2008(1):5-8.
- [8] 孙勇智.人工免疫系统模型算法及其应用研究[D].杭州:浙江大学,2004.
- [9] 王静,保文星.基于克隆选择遗传算法的图像阈值分割[J].计算机工程与设计,2010,31(5):1070-1072.
- [10] de Castro L N, Timmis J. Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach [M]. British: Springer-Press, 2002.
- [11] 常志英,韩莉,姜大伟.改进的克隆选择算法及其应用[J].计算机工程,2011,15(1):173-174.
- [12] 殷爱菡,张培洲,焦曰里.改进的自适应双时序算法的研究与仿真[J].计算机工程,2009,35(24):130-132.

(上接第 100 页)

- [8] 孙献璞,张艳玲,李建东.无线动态令牌协议及性能分析[J].电子学报,2009,37(10):2039-2043.
- [9] 熊昊翔,李峰,李平.基于节能的无线传感器网络 LEACH 协议改进[J].计算机技术与发展,2007,17(11):237-240.
- [10] 王国芳,李腊元.基于 LEACH 和 PEGASIS 的节能可靠路由协议研究[J].计算机技术与发展,2009,19(11):115-

118.

- [11] 杨光旭,刘方爱,赵学臣. OMNeT++ 平台上无线传感器网络仿真系统的研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3443-3446.
- [12] 卢建刚,乐红兵.基于区域划分的 WSN 非均匀分簇算法[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(8): 2639-2642.