

# 农田信息采集单多跳共存 LEACH 算法\*

沈明霞<sup>1</sup> 马奉先<sup>1</sup> 孙玉文<sup>1</sup> 周良<sup>1</sup> 林相泽<sup>2</sup> 熊迎军<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

**【摘要】** 针对农田环境信息量丰富的特点, 提出一种基于 LEACH 算法的改进型无线传感器网络路由算法——LEACH-SMC。在 LEACH-SMC 算法的稳态阶段, 簇头节点到基站间通信采用临界距离来判断和选择多跳或单跳方式, 在多跳方式中采用基于最小能量消耗的路由方式。应用 Matlab 对 LEACH-SMC 算法和 LEACH 算法进行仿真对比分析, 结果表明, LEACH-SMC 算法能提高网络有效覆盖面积并延长整个网络的寿命。

**关键词:** 农田信息采集 无线传感器网络 LEACH 算法

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0163-06

## Improved LEACH Algorithm with Coexistence of Single-hop and Multi-hop Based on the Farm Fields

Shen Mingxia<sup>1</sup> Ma Fengxian<sup>1</sup> Sun Yuwen<sup>1</sup> Zhou Liang<sup>1</sup> Lin Xiangze<sup>2</sup> Xiong Yingjun<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

### Abstract

An improvement of LEACH algorithm was proposed, named LEACH-SMC. The LEACH-SMC protocol algorithm was carried out round by round, and every round was divided into two sections of setup phase and steady station. A critical distance was specified for every cluster head to judge when to use the single-hop or the multi-hop mode between the cluster heads and the base station. The coverage area was greatly improved by the multi-hop manner, and this manner also provided practical value in the nodes distribution in the farm field. It was effective for transmitting the message by single-hop mode, and it could greatly reduce the information delay and packet loss rate too. The coexistence of single-hop and multi-hop can combine the advantages. Simulation results demonstrated that LEACH-SMC protocol could increase network effective coverage area and prolong the network lifetime.

**Key words** Farm field information collection, Wireless sensor networks, LEACH algorithm

### 引言

目前无线传感器网络分簇算法大多是面向开放性区域进行研究的, 针对特殊环境限定区域的则较少。LEACH<sup>[1]</sup>是一种典型的无线传感器网络分簇算法, 将基于 LEACH 算法的无线传感器节点布设在农田中, 可对土壤的墒情(温湿度)、pH 值、空气温湿度等参数进行实时监测, 为农田施肥灌溉等提

供信息支持<sup>[2-4]</sup>。但是, LEACH 算法规定簇头节点到基站间只能采用点对点的单跳通信方式<sup>[5]</sup>, 并且随着算法的不断执行, 会出现不同簇头能量消耗不均衡现象, 这将大大缩短网络寿命<sup>[6]</sup>。上述问题使 LEACH 算法不适合直接应用于广阔农田。本文提出一种改进型算法——LEACH-SMC。该算法在簇头节点与基站通信时采用单跳与多跳共存的方式, 将单跳方式的延迟小、数据丢包率低等特点与多跳

方式的网络覆盖面积大、能量效率高等特点相结合。同时,在多跳方式中采用簇头-簇头-基站的能量消耗最小路径,有利于降低节点的能耗,延长节点和网络的寿命。

## 1 LEACH-SMC 算法

### 1.1 LEACH 算法及其改进算法

LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy) 算法每执行一次称为一“轮”,每轮由构建阶段和稳定阶段组成。算法希望在每轮执行过程中形成  $k$  个簇。每个节点  $i$  在第  $r+1$  轮的开始(时间为  $t$ )以概率  $P_i(t)$  将自己选取为簇头,选取过程形成的簇数期望值为  $k$ 。LEACH 算法针对整个初始阶段节点具有相等能量给出的相应概率计算公式为

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k[r \bmod (N/k)]} & (C_i(t) = 1) \\ 0 & (C_i(t) = 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中,如果节点  $i$  在最近的  $r \bmod (N/k)$  轮中担任过簇头节点,则  $C_i(t) = 0$ ,否则  $C_i(t) = 1$ 。

LEACH-C (LEACH-centralized) 算法解决了 LEACH 算法中“节点根据随机数决定是否当选为簇首”以及“每轮产生的簇首没有确定的数量和位置”等方面的问题,大大提高了簇的生成质量。但由于每个节点都需向基站周期性地报告它们的能量和位置等信息,成簇开销较大。而 LEACH-SMC 算法一旦成簇则簇的大小与簇成员数量成为定值,且节点不必周期性向基站发送报告,因此 LEACH-SMC 算法能够降低网络能量消耗,特别是在较大网络中节点与基站距离较远时,效果更为明显。

HEED (hybrid energy-efficient distributed clustering) 算法也是从分簇方法入手,对 LEACH 算法作了相应的改进,它在选择簇首的时候考虑了节点能量这一因素。但是同 LEACH-C 算法一样,在数据传输阶段,HEED 算法采用单跳方式发送数据,所以在能量有效性方面 LEACH-SMC 算法优于 HEED 算法。

PEGASIS (power-efficient gathering in sensor information system) 算法主要通过贪婪算法将网络中所有节点构成一条链路,在链上选择一个节点作为链头节点,并且在数据传输过程中使用 Token 进行控制。虽然 PEGASIS 算法采用了多跳方式向基站发送数据,但是其最后向基站发送数据的节点只有一个,而在 LEACH-SMC 中却有多个簇头节点与基站通信,这可以有效地把整个区域内能量消耗分担到多个节点上去,均衡了节点的能量消耗、延长了网络寿命。

### 1.2 单跳与多跳

在大部分环境里,无线信号随着传输距离增大按指数规律衰减,采用中继节点的方法可以比直接通信所消耗的能量更少。当所有接收机的信噪比 (SNR) 恒定时,若直接通信距离为  $d$ ,则需要  $cd^\alpha$  辐射能量 ( $c$  为一常数;  $2 \leq \alpha \leq 5$ , 为路径损失系数);若在  $d/2$  处安装一个中继节点,则辐射能量下降到  $2c(d/2)^\alpha$ <sup>[7]</sup>。但是,在节点节能方面,并非采用中继节点实现簇头多跳方式绝对优于单跳方式。上述分析只是考虑了辐射的能量,而不是实际消耗的能量,特别是没有考虑中继节点消耗的能量。短距离通信时采用中继节点,实际上浪费了能量。因此,如果没有考虑这层关系就认定多跳技术能够节能则是一个误解。Min 和 Chandrakasan<sup>[8]</sup> 将其列为无线通信中有关能耗的最主要误区。直接通信与多跳通信的分界线距离主要取决于元器件的参数与实际应用的环境参数。

### 1.3 模型建立

为了探求这种分界线距离,首先构建一个类似于文献[5]中的收发机通信模型来表示节点向距离为  $d$  处发送一个数据包所要消耗的能量值,模型为

$$E = l + cd^\alpha \quad (2)$$

其中  $l$  表示在收或发数据中的硬件电路损耗,  $cd^\alpha$  表示数据包在射频放大过程中的能量消耗,  $c$  是一个常量,与收发机天线的增益有关,  $\alpha$  是数据包发送过程能量消耗的度量值,它受周围环境影响很大。在楼房集中区域、工厂区以及密度较大的农作物区域等,  $\alpha$  的值会比较大,一般为 3~5。在一些空旷地区,这个值则较小,一般只有 2 左右。

本文提出的 LEACH-SMC 算法将根据江苏洪泽湖农场一块实验麦田的实际特征进行仿真。该实验田呈矩形,4 个顶点经纬度坐标分别为  $A(118^\circ 23' 45.89'', 33^\circ 25' 14.92'')$ 、 $B(118^\circ 24' 0.996'', 33^\circ 25' 3.07'')$ 、 $C(118^\circ 24' 7.78'', 33^\circ 25' 8.75'')$ 、 $D(118^\circ 23' 52.89'', 33^\circ 25' 20.67'')$ 。

麦田长约为 534.46 m,宽约为 247.71 m,面积约为 132 389.40 m<sup>2</sup>。实验田地势平坦,无明显起伏,田中有少量建筑物,高度均在 4.00 m 以内,种植烟农 9 号等各类实验麦苗,作物高度 1.00 m 左右。为此,本文选取  $\alpha$  值为 4 进行仿真实验。

根据式(2)的模型,对于簇头到基站的单跳通信方式,若保证整个网络能正常运行  $T$  轮,则其能量消耗为

$$E_s = T(l + cd^\alpha) \quad (3)$$

对于簇头到基站的多跳通信方式,为简化分析,假设信源节点到信宿节点间只有一次数据包的中

转,并且节点在收与发数据包过程中的硬件损耗量相同。如图1所示。

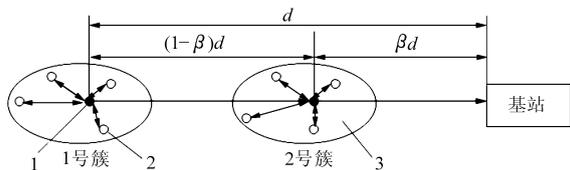


图1 簇头与基站多跳通信原理图

Fig. 1 Sketch of the communication between cluster head and database by a multi-hop mode

1. 簇头 2. 簇成员 3. 簇的覆盖区域

图中,1号簇头是信源节点,2号簇头作为中间转发节点,基站是信宿节点, $\beta$ 是一个0到1之间的实数。1号簇头发出的数据包经2号簇头转发后被基站接收。对于簇头到基站的多跳通信方式,若保证整个网络能正常运行  $T$  轮,则其能量消耗为

$$E_m = T\{2l + c(\beta d)^\alpha + l + c[(1 - \beta)d]^\alpha\} \quad (4)$$

令  $E_s/E_m = 1$ ,即在同等条件下,单跳通信与多跳通信所消耗的能量相同,则有

$$\frac{T(l + cd^\alpha)}{T\{2l + c(\beta d)^\alpha + l + c[(1 - \beta)d]^\alpha\}} = 1 \quad (5)$$

由于上文已经讨论过  $\alpha$  的取值问题,在较密集的农田中, $\alpha$  值取为4,代入式(5)有

$$2\beta^4 - 4\beta^3 + 6\beta^2 - 4\beta + \frac{2l}{cd^4} = 0 \quad (6)$$

由于  $\frac{2l}{cd^4}$  的各参数 ( $l, c, d$ ) 或与具体硬件电路有关或与实际应用环境相关,但在某一项具体应用中,该项为确定已知。所以,可以通过迭代的办法求得  $\beta$ 。

### 1.4 LEACH - SMC 的工作机制

LEACH - SMC 是 low energy adaptive clustering hierarchy single-hop and multi-hop coexistence 的缩写,即单多跳共存的低功耗自适应分簇算法。

与 LEACH 算法类似,每一次 LEACH - SMC 算法的执行被称为一“轮 (Round)”,每轮由构建阶段和稳态阶段组成,如图2所示。在构建阶段,节点被分成若干个簇,并选举产生相应的簇头和决定簇成员的归属。在稳态阶段,LEACH - SMC 算法与 LEACH 算法相比有了本质的区别。

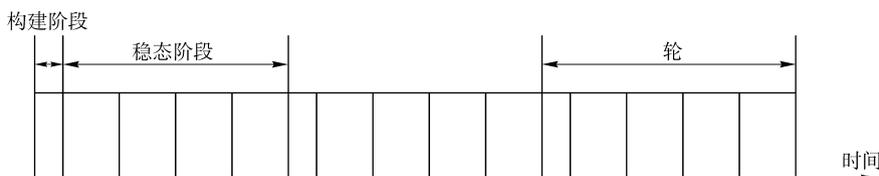


图2 LEACH - SMC 构建和稳态阶段示意图

Fig. 2 Sketch of the setup and steady state of LEACH - SMC algorithm

为了便于讨论分析,假定所有节点在初始条件下都具有相同的能量。下面针对每个阶段的过程进行详尽的描述。

#### 1.4.1 构建阶段

(1) 簇首节点选举:LEACH - SMC 簇首节点的选举机制与 LEACH 算法相似。网络中的传感器节点生成 0 ~ 1 之间的随机数,如果该随机数小于阈值  $P_i(t)$ ,则该节点被选为簇头节点。

(2) 簇头被选定后,采用非持续 CSMA 的 MAC 协议广播一个 ADV (advertisement) 消息。非簇头节点在接收到周围簇头节点的 ADV 消息后,根据接收信号强度确定加入到哪个簇当中(选择接收信号强度最大的那个簇头)。一旦非簇头节点决定加入到哪个簇之后,采用非持续 CSMA 的 MAC 协议向其选择的簇头发送消息,通知簇头将成为它的一个成员<sup>[9]</sup>。在收到非簇头节点的消息后,簇头基于成员节点的数目产生一个 TDMA 时隙表,为每个成员分配时隙,从而保证了数据消息间没有冲突,当各节点知道了自己的时隙后就进入稳态阶段。

#### 1.4.2 稳态阶段

(1) 各个簇头计算出和基站之间的距离,构成集合

$$d = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$$

选取其中的最大距离  $d_{max}$ ,以  $\beta d_{max}$  距离作为簇头节点选择与基站进行单、多跳通信的分界线。当  $d_i \geq \beta d_{max}$  且  $d_i \in d$  时,簇首采用多跳方式与基站通信。当  $d_i < \beta d_{max}$  且  $d_i \in d$  时,簇首采用单跳方式与基站通信。

(2) 每个选择进行单跳通信的节点向网络中进行广播。其余单跳节点对于接收到的广播内容不予理会,所有选择多跳通信的节点将记下单跳节点的网络标号等广播内容,并形成集合  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ ,  $n$  表示最大选择单跳节点数。

(3) 选择进行多跳通信的节点依据  $G$  中保存的单跳节点的网络标号等信息向单跳节点进行广播,假设有  $m$  个多跳节点及  $n$  个单跳节点,则采用一次转发方式可以形成  $m \times n$  条路由途径,每一条途径的能量消耗记为  $RC_i RC_j, i \in (1, m), j \in (1, n)$ 。

则  $\min(RC_i RC_j)$  为最小能量消耗的路由方式。

(4) 单跳节点直接与基站进行通信,多跳节点选择  $\min(RC_i RC_j)$  路径与基站通信。

(5) 稳定阶段持续一段时间后,网络重新进入上述簇的建立阶段和稳定阶段,不断循环。

### 1.5 LEACH-SMC 算法示意图

如图3所示,矩形代表一块麦田区域,在LEACH-SMC算法的构建阶段后,被划分成了6个簇区域。空心圆点代表簇成员,实心圆点代表簇头节点,基站位于矩形区域的外部。图中簇1中的簇头到基站的距离最远,距离为  $d_{\max}$ ,则以  $\beta d_{\max}$  作为簇头到基站单、多跳通信的分界线距离。图中以矩形中间的一条粗虚线代表分界线,虚线右侧各簇簇头(即4、5、6号簇的簇头)可以直接单跳通信,点虚线条代表簇头节点与基站直接通信。粗虚线左侧各簇头(即1、2、3号簇的簇头)要采用多跳通信方式。由1、2、3号簇簇头分别发出的并在4、5、6号簇簇头处终止的箭头代表多跳通信方式的第一跳,4、5、6号簇簇头又分别与基站建立连接。通过比较每一条通路的能量消耗( $RC_i RC_j$ ),选择能量消耗最小的一条,即构成多跳通路。

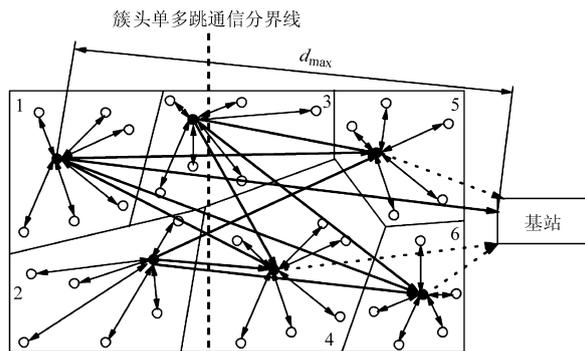


图3 LEACH-SMC 算法示意图

Fig. 3 Sketch of LEACH-SMC algorithm

## 2 仿真结果及分析

### 2.1 仿真内容

(1) 在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的麦田区域内,随着算法轮数的增加,比较分析 LEACH-SMC 算法与 LEACH 算法的死亡节点数和总能量消耗量的变化趋势。

(2) 在  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  的麦田区域内,重复上述比较。

### 2.2 仿真条件

仿真软件: Matlab 2006b。仿真参数如下:假设网络中传感器节点数  $n$  为 100 个;每个节点初始能量为  $0.50\text{ J}$ ;麦田区域为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  和  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  两种情况; $p$  是簇头节点数与节点总数的比值

(取  $p = 0.05$ );  $l = 50\text{ J/bit}$  表示接收机电路和发射机电路每处理  $1\text{ bit}$  数据的功耗; $c = 0.000\,065\text{ J/bit}$  表示发射放大器向单位面积发射  $1\text{ bit}$  数据的功耗;仿真时间  $r$  取 1000 轮;网络中基站的位置设定为  $(150, 50)$  和  $(250, 100)$ 。

### 2.3 仿真结果及分析

图4中空心圆点表示簇成员,“+”表示簇头。

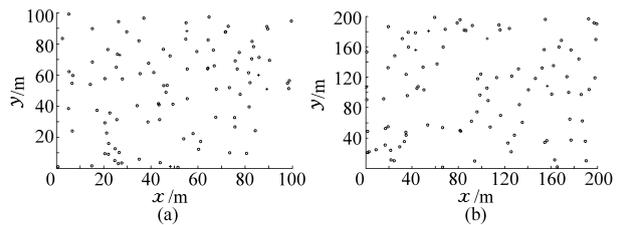


图4 100个节点在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  和  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田区域内的随机分布图

Fig. 4 Random distribution of 100 nodes in areas of 10 thousand square meters and 40 thousand square meters

(a)  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  麦田 (b)  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田

如图5a所示,在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  的麦田中,LEACH 算法在被执行到约 500 轮时节点已经全部死亡,而 LEACH-SMC 算法在被执行到约 920 轮时节点才全部死亡。同时,LEACH-SMC 算法直到 100 轮以后才出现第一个死亡节点,而此时 LEACH 算法的死亡节点数已经超过 20 个。

如图5b所示,在  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田区域中,LEACH 算法的节点在 320 轮左右时已经全部死亡,LEACH-SMC 算法的节点在 850 轮左右时才全部死亡。对比 100 个节点随机分布在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  麦田的情况,LEACH 算法中节点全部死亡的轮数提前了 180 轮左右,而 LEACH-SMC 算法中节点全部死亡的轮数只提前了约 70 轮。在农田面积增加 4 倍的情况下,LEACH 算法中节点全部死亡时间大大提前,而 LEACH-SMC 算法的节点全部死亡时间变化相对较小,表明 LEACH-SMC 算法相对于 LEACH 算法能提供更大的有效覆盖面积。

如图6a所示,在  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  麦田区域内,LEACH 算法在被执行到约 500 轮时,网络所有能量 ( $50\text{ J}$ ) 被耗尽;LEACH-SMC 算法在被执行到 920 轮左右时网络总能量耗尽。LEACH 算法曲线在开始的前半段能量消耗的速度较快,而后半段则相对较慢,究其原因开始阶段随机选取的簇头节点距离基站较远,致使发射功率大增,能量损耗较大,而后半段由于选取的簇头节点较基站较近,故能量消耗较小。相比较而言,LEACH-SMC 曲线全程比较平稳,没有急升急降等阶段,原因是由于簇首节点依

据位置到基站的实际距离选择采用了单跳或多跳的通信方式,有效降低了簇头节点能量的过度消耗,避免了由于各轮簇头节点到基站距离不同,能量的不均衡消耗。图 6b 表示在  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田区域

中,LEACH 算法在被执行到约 320 轮时网络总能量耗光,LEACH-SMC 算法在被执行到约 850 轮时总能量耗尽。因此相对 LEACH 算法而言,LEACH-SMC 算法的网络寿命延长了 2.5 倍以上。

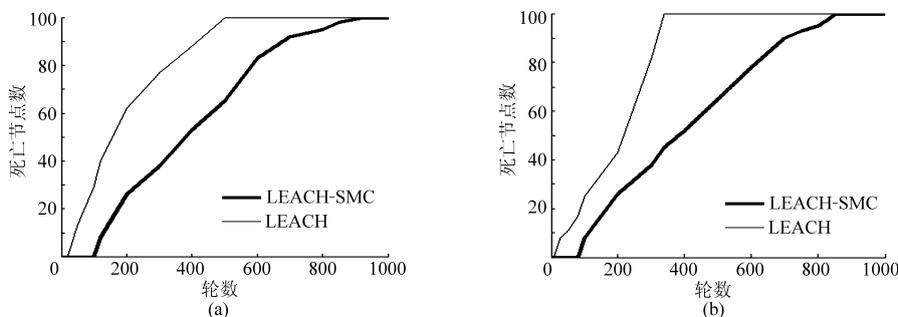


图 5  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  与  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田区域中 100 个节点轮数与死亡节点数关系

Fig. 5 Relationships between round numbers and dead node numbers of 100 nodes in areas of 10 thousand square meters and 40 thousand square meters

(a)  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  麦田 (b)  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田

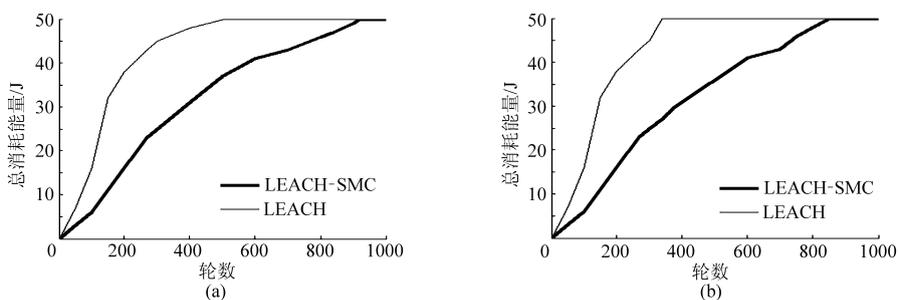


图 6  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  与  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田区域中 100 个节点轮数与总消耗能量关系

Fig. 6 Relationships between round numbers and total energy consumption of 100 nodes in areas of 10 thousand square meters and 40 thousand square meters

(a)  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  麦田 (b)  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  麦田

### 3 结束语

提出了在农田环境下的单多跳共存 LEACH 改进算法——LEACH-SMC 算法。由于继承了 LEACH 按轮选举簇头的特点,使得新算法各簇能量消耗均衡地分布在各节点上;根据簇头节点到基站间通信的临界距离采用单跳与多跳共存模式;在多

跳模式中选择簇头节点到基站最小能量消耗的路由途径。仿真主要针对在特定农田区域内的有效覆盖面积和节点能量利用效率情况,对传统 LEACH 算法与本文提出的 LEACH-SMC 算法进行了对比分析,结果显示 LEACH-SMC 算法在网络的覆盖面积上和网络的生存时间上较 LEACH 都有长足的进步。

### 参 考 文 献

- 1 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii: IEEE Computer Society, 2000:3 005 ~ 3 014.
- 2 冯友兵,张荣标,沈敏.面向精确灌溉的无线传感器网络构建[J].农业机械学报,2009,40(1):56~59.  
Feng Youbing, Zhang Rongbiao, Shen Min. Construction of wireless sensor networks for precision irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 56 ~ 59. (in Chinese)
- 3 乔晓军,张馨,王成,等.无线传感器网络在农业中的应用[J].农业工程学报,2005,21(2):232~234.  
Qiao Xiaojun, Zhang Xin, Wang Cheng, et al. Application of the wireless sensor networks in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2): 232 ~ 234. (in Chinese)
- 4 刘卉,汪懋华,王跃宣,等.基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统的设计与开发[J].吉林大学学报:工学版,2008,38(3):605~606.

- Liu Hui, Wang Maohua, Wang Yuexuan, et al. Development of farmland soil moisture and temperature monitoring system based on wireless sensor network[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(3): 605 ~ 606. (in Chinese)
- 5 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 ~ 670.
- 6 Vivek Mhatre, Catherine Rosenberg. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation[J]. Ad. Hoc. Networks, 2004, 2(1): 45 ~ 63.
- 7 Holger Karl, Andreas Willig. 无线传感器网络协议与体系结构[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- 8 Min R, Chandrakasan A. MobiCom poster: top five myths about the energy consumption of wireless communication[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(1): 65 ~ 67.
- 9 Zhang Yan, Luo Jijun, Hu Honglin. 无线网状网: 架构、协议与标准[M]. 郭达, 张勇, 彭晓川, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 10 肖德琴, 周权, 王景利, 等. 基于精细化梯度的水分传感器网络能量高效查询算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 169 ~ 176.  
Xiao Deqin, Zhou Quan, Wang Jingli, et al. Energy-efficient query algorithms for moisture sensor networks based on fine-grain gradient[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 169 ~ 176. (in Chinese)
- 11 张喜海, 张长利, 房俊龙, 等. 面向精细农业的土壤温度监测传感器节点设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 237 ~ 240.  
Zhang Xihai, Zhang Changli, Fang Junlong, et al. Smart sensor nodes for wireless soil temperature monitoring systems in precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Sup.): 237 ~ 240. (in Chinese)

(上接第 157 页)

#### 参 考 文 献

- 1 陈复生. 食品超高压加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 2 Boonyaratanakornkit B B, Park C B, Clark D S. Pressure effects on intra- and intermolecular interactions within proteins[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2002, 1595(1~2): 235 ~ 249.
- 3 Lullien-Pellerin V, Balny C. High-pressure as a tool to study some proteins' properties: conformational modification, activity and oligomeric dissociation[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2002, 3(3): 209 ~ 221.
- 4 Gianibelli M C, Larroque O R, MacRitchie F, et al. Biochemical, genetic and molecular characterization of wheat glutenin and its component subunits[J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(6): 635 ~ 646.
- 5 Day L, Augustin M A, Batey I L, et al. Wheat-gluten uses and industry needs[J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(2): 82 ~ 90.
- 6 Apichartsrangkoon A, Ledward D A, Bell A E, et al. Physicochemical properties of high pressure treated wheat gluten[J]. Food Chemistry, 1998, 63(2): 215 ~ 220.
- 7 Kieffer R, Schurer F, Köhler P, et al. Effect of hydrostatic pressure and temperature on the chemical and functional properties of wheat gluten: studies on gluten, gliadin and glutenin[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(3): 285 ~ 292.
- 8 Valérie Micard, Stéphane Guilbert. Thermal behavior of native and hydrophobized wheat gluten, gliadin and glutenin-rich fractions by modulated DSC[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2000, 27(3): 229 ~ 236.
- 9 GB/T5506.2—2008 小麦和小麦粉 面筋含量 第2部分: 仪器法测定湿面筋[S].
- 10 SB/T10137—1993 面条用小麦粉[S].
- 11 GB/T10220—1988 感官分析方法总论[S].
- 12 GB/T14614—2006 小麦粉 面团的物理特性 吸水性和流变学特性的测定 粉质仪法[S].
- 13 Akinori Mizuno, Masata Mitsuiki, Masao Motoki. Effect of transglutaminase treatment on the glass transition of soy protein [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3286 ~ 3291.
- 14 张先和, 任云丽, 高巍. 正确评价小麦品质[J]. 粮油食品科技, 2000, 8(1): 22 ~ 23.