

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.039

# 基于 Zigbee 通信的节能型混合式机械增氧系统\*

蒋建明<sup>1,2</sup> 史国栋<sup>1,2</sup> 赵德安<sup>1</sup> 史兵<sup>1,2</sup> 王军<sup>2</sup> 宦娟<sup>1,2</sup>

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 常州大学信息科学与工程学院, 常州 213064)

**摘要:** 构建了一套增氧系统,采用耕水机和微孔曝气增氧机混合增氧的模式,白天通过定时控制以耕水机工作为主,晚上或阴雨天缺氧时以微孔曝气增氧为主。在环境参数不断变化的情况下,为了保持溶解氧的稳定,控制方法采用误差反传的模糊神经网络控制。试验表明,在相同条件下采用混合式增氧控制较传统的叶轮式增氧可节约电能 40.6%,提高产量 31.9%,最终利润提高 136.1%。水质参数测量采用 Zigbee 通信,通信协议采用优化的低能量自适应分层协议,并根据水体溶解氧测量的实际要求,设置参数测量的软、硬阈值以减少节点数据发送的次数,达到节能和供电电池剩余能量均衡的目的,试验表明优化后的无线传感网络寿命延长了 58%。

**关键词:** 增氧机 耕水机 混合式 节能 Zigbee 模糊神经网络

中图分类号: TN919.72; S969.32 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)10-0242-06

## Energy-efficient Hybrid Mechanical Aeration System Based on Zigbee Communication

Jiang Jianming<sup>1,2</sup> Shi Guodong<sup>1,2</sup> Zhao Dean<sup>1</sup> Shi Bing<sup>1,2</sup> Wang Jun<sup>2</sup> Huan Juan<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213064, China)

**Abstract:** The hybrid applications of biofan and micro-porous aerator were adopted. Biofan was mainly used in daytime and micro-porous aerator was mainly used usually at night or in rainy days. With the changing environmental parameters, a fuzzy neural network based on reversed error propagation was applied to maintain the stability of dissolved oxygen. Tests showed that 40.6% energy was saved. The output was increased by 31.9% and the final margin was increased by 136.1%. Zigbee network was applied in the measurement of water quality parameters. The optimized LEACH communication protocol was used to achieve the purpose of node energy conservation and loss balance. According to the actual measurement of dissolved oxygen requirements, soft and hard threshold parameters were set to reduce sending times of mode data. Tests showed that the lifetime of optimized wireless sensor network was extended by 58%.

**Key words:** Aerator Biofan Hybrid Energy-efficient Zigbee Fuzzy neural network

### 引言

随着水产品需求的日益增长,我国的水产养殖业得到了迅猛发展,已成为世界上最大的水产养殖国,但主要为粗放型增长。一些西欧国家水产养殖

系统机械化和自动化程度都很高,但价格昂贵且能耗大。为了响应国家节能减排的要求和减少人力成本,迫切需要建立高效的适合我国国情的工业化水产养殖系统。溶解氧是水产养殖中的制约因子。王兴国等研究了叶轮式、水车式、微孔曝气式和耕水机

收稿日期: 2013-02-17 修回日期: 2013-03-31

\* 国家自然科学基金资助项目(60971090)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2013005-3)和江苏省科技厅前瞻性研究资助项目(2011Z0102)

作者简介: 蒋建明,博士生,常州大学副教授,主要从事计算机测量与远程监控研究,E-mail: jjm-224@163.com

通讯作者: 史国栋,教授,博士生导师,主要从事农业机械及电气化研究,E-mail: jsjby@em.jpu.edu.cn

等增氧方式,分析了不同增氧方式的适用范围和优缺点<sup>[1-9]</sup>。

为充分发挥耕水机和微孔曝气增氧机各自的优势,构建一套白天以耕水机长时间工作为主和缺氧时以微孔曝气增氧机增氧为主的混合式机械增氧系统。水环境因子测量后采用 Zigbee 通信,通信协议采用优化的低能量自适应分层协议,达到节约供电电池能量及延长网络有效生命周期的目的;耕水机功率小采用定时控制,微孔曝气增氧机采用误差反传的模糊神经网络变频控制,达到节约电能及人力成本的目的。

## 1 系统结构

系统硬件结构如图 1 所示。由于水产养殖中养殖池一般地处偏僻,每个参数测量点采用有线通信时在水面架设通信电缆成本大、安装困难,而 Zigbee 通信节点具有成本低廉、体积小、安装简便等优点,因此系统参数测量后采用 Zigbee 无线通信。控制器接收到测量信号后把测量参数通过以太网传送给控制中心,同时对养殖池中溶解氧采用混合式增氧控制<sup>[10]</sup>。

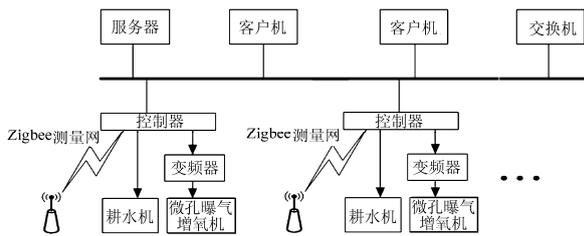


图 1 系统硬件结构图

Fig. 1 Structure diagram of hardware system

### 1.1 Zigbee 通信

系统的 Zigbee 通信采用 LEACH 路由协议,该协议将网络中的节点分为若干个簇,每一个簇由一个簇头管理其他节点(本系统每个养殖池由于节点相对较少,只选一个簇头)。簇头节点除了自身的数据采集和其他节点信息的收集,还要把数据融合后向 BS(基站节点,固定电源供电)节点发送,能量消耗相对较大<sup>[11-12]</sup>。非簇头节点只需要与簇头节点通信,当簇头节点进行数据融合和发送时,非簇头节点除了定时采集信息外大部分时间可以处于休眠状态。如果某个节点常用作簇头节点,则会先于其他节点因能量损耗过多而失效,失效节点过多将使网络瘫痪。常规 LEACH 路由协议提出了周期性地选择节点充当簇头节点,使各节点供电电池剩余能量均衡。当新的簇头节点形成后,其他非簇头节点寻找最近的簇头,并加入所形成的簇。但供电电池初始电容量有差异,而且消耗也不均衡,很容易导致

个别节点提前失效。为了实际监测供电电池(标准工作电压 3.2V 的 IFR26650 锂电池)的能量,每个节点把电池的电压信号通过 A/D 转换器传输给节点 CPU。Zigbee 通信节点 MCU 采用 Chipcon 公司的 CC2430 芯片,工作电压范围为 2.0 ~ 3.6 V。当监测到电池供电电压长期低于 2 V 时,节点自动停止工作。由于电池供电电压与能量并不是线性关系,而且节点 CPU 不适宜进行复杂的算法运算,因此节点根据在非发送信号状态下所测供电电池电压进行查表,估算出自己供电电池能量  $E_{i(t)}$ ,然后发送给基站节点,基站节点根据节点剩余能量的多少选取簇头。当在  $N$  个节点中选取  $k$  个簇头时,每个节点被选作簇头的概率为

$$P_{i(t)} = \frac{kE_{i(t)}}{E_{1(t)} + E_{2(t)} + \dots + E_{N(t)}} \quad (1)$$

由式(1)可知,节点电池剩余能量越多,被选作簇头的概率越高,反之则越低,以此达到各节点供电电池剩余能量均衡的目的<sup>[13-14]</sup>。

在工作过程中节点定时不断采集数据并向簇头发送,节点能耗从大到小依次为数据发送、数据接收、参数测量、数据处理,数据发送的能耗远大于其他各项。因此减少数据的发送次数可以大幅减小节点能耗。由于系统主要监控溶解氧含量,因此在系统测量精度范围内,簇头确定后即发送溶解氧含量 2 个设定值给各个节点,设定值 1(硬阈值)为测量参数的最低有效值,只有当测量数据大于设定值 1 时系统才认为有效;设定值 2(软阈值)为允许误差,测量数据大于设定值 1 且与上次发送数据差值的绝对值大于设定值 2,则发送数据,否则不发送,并默认当前溶解氧含量与上次发送值一致。当测量数据长时间达不到设定值时,簇头节点在该段时间内就得不到数据,为此系统设置了一个计时器,当计时时间到则发送测量数据,节点通过减少数据的发送达到节约电池能量的目的<sup>[15-17]</sup>。

### 1.2 控制器及增氧机械

控制器结构如图 2 所示,CPU 选取 TI 公司的 TMS320LF2407 芯片,外接 RELTEK 公司的以太网接口芯片 RTL8019AS 与以太网相连。由于 Zigbee 基站距离控制器近,控制器从串行通信口读取 Zigbee 基站信号后通过以太网把传感器信号传输到控制中心,同时根据溶解氧含量的变化对耕水机、微孔曝气增氧机进行控制。

耕水机主要由驱动电机、减速器、浮杆、浮球和耕板组成,功率一般为几十瓦。它用超节能的耕水驱动方式将底层水纵向缓慢提升,使表层水和底层水连续循环和不断置换。不仅散发了有毒气体、溶

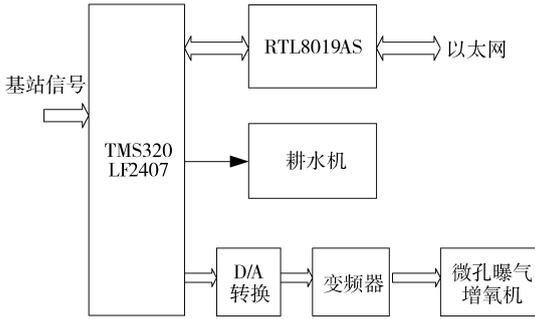
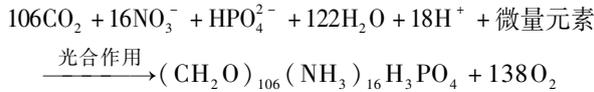


图2 控制器结构图

Fig.2 Structure diagram of controller

入了一定数量的新鲜空气、促进了整个水体和温度的平衡,而且可以促使有益藻类和浮游生物的繁殖生长,吸收和降低氨氮和亚硝酸盐的含量。表层水和底层水连续的循环促进了整个水体藻类的光合作用,而不仅仅主要局限于表层水体。光合作用的计量关系为



在光合作用的过程中藻类吸收水中大量  $\text{CO}_2$  和产生  $\text{O}_2$ 。耕水机在水体缺氧时,尤其是晚上或阴雨天不具有应急增氧的能力。因此耕水机虽然节能,却不能单独使用。

微孔曝气增氧机是近几年在水产养殖业发达省份兴起和政府积极推广的新型水体增氧设备,由罗茨风机(空压机、滑片泵等)、通气总管、支管、接头、软管和曝气管(盘)和支架等组成。曝气盘上的曝气微孔直径一般在  $0.01 \sim 0.05 \text{ mm}$ ,在水下时由于表面张力的原因,水不会渗入管中,工作时在  $0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$  压力下将空气从微孔中挤出,在水中生成无数个直径为  $0.5 \sim 2 \text{ mm}$  的微型气泡,在水中形成雾状螺旋上升,扩散距离约  $1.5 \sim 3 \text{ m}$ 。气泡的不断上升,增加了空气与水体的接触面积,降低了液膜厚度,同时新鲜空气由罗茨风机不断地充入水中,提高了增氧效率。

为了充分发挥耕水机和微孔曝气增氧机各自优势,在每个面积约  $2000 \text{ m}^2$  养殖池中选用一台耕水机( $60 \text{ W}$ )和一台微孔曝气增氧机( $1.5 \text{ kW}$  罗茨风机驱动)混合增氧。

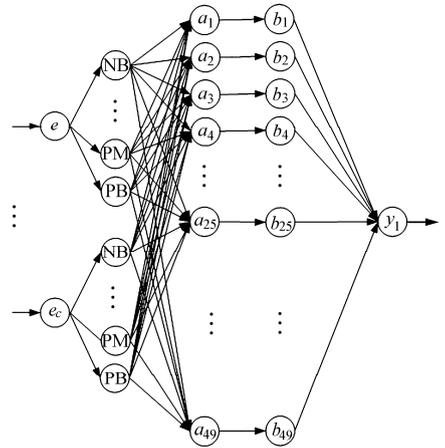
## 2 增氧机械控制

### 2.1 耕水机定时控制

耕水机工作时间通过 CPU 内部定时器精确控制,由于耕水机白天可利用自然条件大幅提高工作效率,工作时间设定为  $0:00 \sim 20:00$ 、 $21:00 \sim 24:00$ 。耕水机晚上分时段停机、白天连续工作,既充分发挥了白天工作效率高的特点,又延长了电机使用寿命。

### 2.2 微孔曝气增氧机的模糊神经网络控制

由于气候不断变化,影响水体溶解氧含量的因素相差很大,普通控制很难确保溶解氧含量的稳定,因此采用模糊神经网络控制微孔曝气增氧机(图3)。



输入层 隶属层 模糊推理层 归一化层 输出层

图3 模糊神经网络结构图

Fig.3 Structure diagram of fuzzy neural network

第1层为输入层,该层的输入节点直接与输入向量的各个分量  $x_i^{(1)}$ , ( $i = 1, 2$ ) 连接,其中(1)代表第一层,余类推。系统中输入向量分别为溶解氧的误差  $e$  和误差变化率  $e_c$ ,该层的节点函数是  $f_i^{(1)} = x_i^{(1)}$  ( $i = 1, 2$ ),即  $f_1^{(1)} = e, f_2^{(1)} = e_c$ 。

第2层为隶属层,采用高斯函数将溶解氧误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  分别划分为7个模糊子集{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},对应表示为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。该层的节点函数为

$$f_{im}^{(2)} = x_{im}^{(2)} = -\frac{(x_i^{(1)} - c_{im})^2}{\sigma_{im}^2} \quad (i = 1, 2; m = 1, 2, \dots, 7) \quad (2)$$

式中  $c_{im}, \sigma_{im}$ ——隶属函数的中心、宽度

第3层是模糊推理层,共有49个节点。节点函数为

$$f_j^{(3)} = x_j^{(3)} = \min \{ x_{1i_1}^{(2)}, x_{2i_2}^{(2)} \} \quad (i_1, i_2 = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 49) \quad (3)$$

对于给定的输入,只有在输入点附近的那些语言变量值才有较大的隶属度,当隶属度小于0.05时近似为零。

第4层是归一化层,节点数与第3层相同。节点函数为

$$f_j^{(4)} = x_j^{(4)} = \frac{x_j^{(3)}}{\sum_{i=1}^{49} x_i^{(3)}} = \frac{a_j}{\sum_{i=1}^{49} a_i} \quad (4)$$

第5层是输出层,输出层输出  $0 \sim 5 \text{ V}$  电压对应于变频器在  $0 \sim 50 \text{ Hz}$  范围内控制微孔曝气增氧电机变频增氧。由于只有一个输出节点,节点函数为

$$f_1^{(5)} = \sum_{j=1}^{49} w_{1j} x_j^{(4)} = \sum_{j=1}^{49} w_{1j} b_j \quad (5)$$

式中  $w_{1j}$ ——第  $j$  个语言值隶属函数的中心值

系统采用的模糊神经网络是多层的前馈网络, 学习算法采用误差反传的方法来设计调整参数。取误差代价函数为  $E = \frac{1}{2} (y_{d1} - y_1)^2$ , 其中  $y_{d1}$  和  $y_1$  分别表示期望输出和实际输出。利用一阶梯度寻优算法来调节  $w_{1j}$ 、 $c_{im}$  和  $\sigma_{im}$ 。

$$\delta_1^{(5)} = -\frac{\partial E}{\partial f_1^{(5)}} = -\frac{\partial E}{\partial y} = y_{d1} - y_1 \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_{1j}} = \frac{\partial E}{\partial f_1^{(5)}} \frac{\partial f_1^{(5)}}{\partial w_{1j}} = -\delta_1^{(5)} x_j^{(4)} = -(y_{d1} - y_1) b_j \quad (7)$$

式中  $\delta$ ——误差代价函数对各层的一阶梯度进一步推导

$$\delta_j^{(4)} = -\frac{\partial E}{\partial f_j^{(4)}} = \delta_1^{(5)} w_{1j} \quad (8)$$

$$\delta_j^{(3)} = -\frac{\partial E}{\partial f_j^{(3)}} = \delta_j^{(4)} \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^{49} a_i}{\left(\sum_{i=1}^{49} a_i\right)^2} \quad (9)$$

$$\delta_j^{(2)} = -\frac{\partial E}{\partial f_j^{(2)}} = \sum_{k=1}^{49} \delta_k^{(3)} S_{im} e^{f_{im}^{(2)}} \quad (10)$$

$f_j^{(3)}$  采用取小运算, 设第  $k$  个结点输入最小, 则

$$S_{im} = \frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial g_{im}^{(2)}} = \frac{\partial f_k^{(3)}}{\partial w_i^{(2)}} = 1, \text{其他为零。}$$

从而求得一阶梯度为

$$\frac{\partial E}{\partial c_{im}} = \frac{\partial E}{\partial f_{im}^{(2)}} \frac{\partial f_{im}^{(2)}}{\partial c_{im}} = -\delta_{im}^{(2)} \frac{2(x_i - c_{im})}{\sigma_{im}^{(2)}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{im}} = \frac{\partial E}{\partial f_{im}^{(2)}} \frac{\partial f_{im}^{(2)}}{\partial \sigma_{im}} = -\delta_{im}^{(2)} \frac{2(x_i - c_{im})}{\sigma_{im}^{(3)}} \quad (12)$$

由此可得到参数调整的学习算法为

$$w_{1j}(k+1) = w_{1j}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial w_{1j}} \quad (13)$$

$$c_{im}(k+1) = c_{im}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial c_{im}} \quad (14)$$

$$\sigma_{im}(k+1) = \sigma_{im}(k) - \beta \frac{\partial E}{\partial \sigma_{im}} \quad (15)$$

式中  $\beta$ ——学习率, 取  $\beta > 0$

式中  $i = 1, 2; m = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 49$ 。

通过模糊神经网络的控制, 当水体溶解氧含量和设定目标值相差较大时, 微孔曝气增氧机快速增氧, 迅速减小与目标值的差距; 当接近目标值时能平稳缓慢提升, 减少了超调。

### 3 试验结果与分析

在江苏省镇江市横塘千亩鱼虾养殖基地的鲈鱼

养殖区进行了试验。在 3 个面积约 2 000 m<sup>2</sup> 的养殖池均匀分布 20 个 Zigbee 节点。在 Zigbee 工作的每一轮中选取簇头, 基站节点需要完成更多的通信和数据处理, 能耗更大, 因此采用电源供电, 架设在岸边控制箱附近。1 号池采用常规 LEACH 协议, 每个节点被轮换选作簇头, 设定节点每 20 s 向簇头发送一次数据; 2 号池采用改进 LEACH 协议, 通过对节点电池能量监控, 使供电电池能量多的节点更多地被选作簇头; 3 号池在改进 LEACH 协议的基础上进一步优化, 设定两个阈值, 硬阈值 3 mg/L, 软阈值 0.05 mg/L, 即只有当测量的溶解氧含量大于 3 mg/L (确认测量值有效) 且本次测量值与上次发送给簇头值之差大于 0.05 mg/L 时才重新发送, 为防止长时间不发送数据, 当距上次发送数据时间达到 200 s 时, 则立即无条件发送。

通过监控发现失效节点个数如图 4 所示, 假定失效节点达到 10 个时 Zigbee 网络瘫痪, 则改进 LEACH 协议网络有效时间(75 d)比常规 LEACH 协议(60 d)延长了 25%, 优化设定阈值后有效时间(95 d)比常规 LEACH 协议延长了 58%。达到了节点电池剩余能量的均衡和节约电池能量的目的。

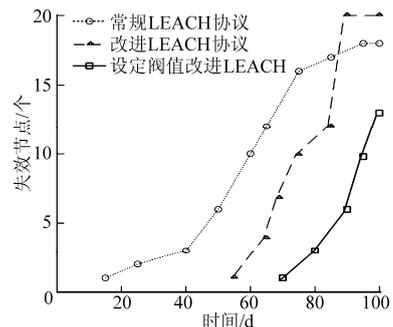


图 4 失效节点示意图

Fig. 4 Schematic of failed node

为了比较耕水机和微孔曝气增氧机混合式增氧与传统的叶轮式增氧的效果, 选定 6 个 2 000 m<sup>2</sup> 鲈鱼养殖池, 分别采用 2 种方式增氧, 混合式增氧如第 2 节所述方式控制, 控制目标值设定为 7.0 mg/L。叶轮增氧池塘采用传统的 2 台 1.5 kW 叶轮增氧机人工控制增氧。在夏季增氧时间为: 19:00 ~ 24:00 一台增氧机工作, 24:00 ~ 7:00 两台增氧机工作, 阴雨天视情况开机。表 1 为夏季某晚上测量的 2 种不同方式增氧的溶解氧含量变化, 可见采用自动控制方式可以保持水体溶解氧含量的稳定。1 年后经统计如表 2 所示。其中采用混合式增氧的养殖池鲈鱼个大味美, 所以价格略高, 而且饲料和用药均相对较少。主要是因为耕水机工作使水体循环促进藻类的光合作用, 藻类能促进浮游生物的生长, 而浮游生物是鱼类的天然饲料。

表1 溶解氧含量变化  
Tab.1 Change of dissolved oxygen content

增氧方式	时刻												
	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00
混合增氧	7.21	7.16	7.08	7.19	7.06	6.95	7.10	7.15	7.10	7.02	7.08	7.17	7.11
叶轮增氧	6.52	6.35	7.18	7.01	6.65	6.32	6.13	7.53	7.61	7.72	7.32	7.12	7.24

表2 养殖池投入与产出数据统计  
Tab.2 Statistics of input and output of breeding pools

塘口	饲料		药品		耗电量		幼苗	其他	产值		利润
	质量/kg	价值/元	用量/kg	价值/元	电量/kW·h	价值/元	价值/元	价值/元	质量/kg	价值/元	价值/元
1(混合增氧)	1 208	5 617	7	280	1 043	574	12 000	11 000	4 379	50 359	20 888
2(混合增氧)	1 253	5 826	2	80	1 135	624	12 000	11 000	4 413	50 750	21 220
3(混合增氧)	1 176	5 468	4	160	1 201	661	12 000	11 000	4 215	48 473	19 184
4(叶轮增氧)	1 532	7 124	21	840	2 106	1158	12 000	3 000	3 215	33 758	9 636
5(叶轮增氧)	1 479	6 877	33	1 320	2 075	1141	12 000	3 000	3 019	31 700	7 362
6(叶轮增氧)	1 508	7 012	26	1 040	2 023	1113	12 000	3 000	3 246	34 083	9 918

## 4 结束语

通过对 Zigbee 低能量分层路由协议的改进和设定阈值,节约了节点供电电池能量,使供电电池剩余能量均衡,增加了无线测控网络的有效寿命。耕水机和微孔曝气增氧机虽然初期投资较大,但通过电气自动控制把两者相结合实现无人值守控制,充

分发挥二者的优点,既节约了人力资源又节约了电力资源,特别适合于大规模工业化水产养殖。但同时应该注意微孔曝气增氧机安装相对复杂,在底部不平整的养殖池不适用,如一些水深且底部不规则的天然养殖池可以考虑采用耕水机与叶轮增氧机混合增氧。

## 参 考 文 献

- 王兴国,王悦蕾,赵水标. 养殖水体增氧技术及方法探讨[J]. 浙江海洋学院学报:自然科学版,2004,23(2):114~117.  
Wang Xingguo, Wang Yuelei, Zhao Shuibiao. Study on a method of increasing oxygen for aquaculture water[J]. Journal of Zhejiang Ocean University :Natural Science,2004,23(2): 114~117. (in Chinese)
- 谷坚,顾海涛,门涛. 几种机械增氧方式在池塘养殖中的增氧性能比较[J]. 农业工程学报,2011,27(1):148~151.  
Gu Jian, Gu Haitao, Men Tao. Performance comparison for different mechanical aeration methods in pond[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(1):148~151. (in Chinese)
- 吴世海. 射流自吸式增氧机[J]. 农业机械学报,2007,38(4):88~92.  
Wu Shihai. Study on aspirating aerator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(4):88~92. (in Chinese)
- 周建来,邱白晶,郑铭. 双侧吸气射流增氧机的增氧性能试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8):70~73.  
Zhou Jianlai, Qiu Baijing, Zheng Ming. Experiment on dual laterolog aspiratoing aerator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(8):70~73. (in Chinese)
- 李玉全,张海艳,李健,等. 水产养殖系统中机械增氧与液态氧增氧的效果比较[J]. 中国农学通报,2008,24(2):475~480.  
Li Yuquan, Zhang Haiyan, Li Jian, et al. The comparison of aeration effect between air aeration and pure oxygen aeration systems in aquaculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(2): 475~480. (in Chinese)
- 曾筱鸿. 耕水机使用性能研究及试验结果分析[J]. 现代农业装备,2008(7):44~49.  
Zeng Xiaohong. Properties of using biofan and experimental analysis[J]. Modern Agricultural Equipments,2008(7):44~49. (in Chinese)
- 丁翔文,张树阁,孙新超. 应用耕水机养殖南美白对虾试验[J]. 农业工程学报,2010,26(8):130~135.  
Ding Xiangwen,Zhang Shuge,Sun Xinchao. Experimental study on applying biofan to cultivate *Penaeus vannamei*[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(8):130~135. (in Chinese)
- 王玮,陆庆刚,顾海涛,等. 微孔曝气增氧机的增氧能力试验[J]. 水产学报,2010,34(1):97~100.  
Wang Wei, Lu Qinggang, Gu Haitao, et al. The oxygen-enriched capacity experiment of micropore aerator[J]. Journal of Fisheries of China, 2010,34(1):97~100. (in Chinese)
- 管崇武,刘晃,宋红桥,等. 涌浪机在对虾养殖中的增氧作用[J]. 农业工程学报,2012,28(9):208~212.  
Guan Chongwu,Liu Huang, Song Hongqiao, et al. Oxygenation effect of wave aerator on shrimp culture[J]. Transactions of the

- CSAE, 2012, 28(9): 208 ~ 212. (in Chinese)
- 10 何东健, 邹志勇, 周曼. 果园环境参数远程检测 WSN 网关节点设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 182 ~ 186.  
He Dongjian, Zou Zhiyong, Zhou Man. Design of WSN gateway nodes for remote detection of orchards environment parameters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 182 ~ 186. (in Chinese)
  - 11 包长春, 李志红, 张立三, 等. 基于 Zigbee 技术的粮库监测系统的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 197 ~ 201.  
Bao Changchun, Li Zhihong, Zhang Lisan, et al. Design of monitoring system for grain depot based on Zigbee technology [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 197 ~ 201. (in Chinese)
  - 12 宁静红, 刘圣春, 严雷. 太阳能蔬菜生产配送基地组合系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 131 ~ 135.  
Ning Jinghong, Liu Shengchun, Yan Lei. Combined system of solar energy vegetable growth and distribution center [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 131 ~ 135. (in Chinese)
  - 13 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181 ~ 185.  
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181 ~ 185. (in Chinese)
  - 14 卿晓霞, 王文章, 王波. 基于节点转移的 Zigbee 网络孤立点减免算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1 650 ~ 1 656.  
Qing Xiaoxia, Wang Wenzhang, Wang Bo. Algorithm of reducing Zigbee network isolated nodes based on node-transporting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7): 1 650 ~ 1 656. (in Chinese)
  - 15 郑凯, 赵宏伟, 张孝临. 基于 Zigbee 心电监护网络的定位系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(5): 1 000 ~ 1 005.  
Zheng Kai, Zhao Hongwei, Zhang Xiaolin. Research on localization system of electrocardiograph monitoring network based on Zigbee [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(5): 1 000 ~ 1 005. (in Chinese)
  - 16 熊迎军, 沈明霞, 孙玉文. 农田图像采集与无线传输系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 184 ~ 187.  
Xiong Yingjun, Shen Mingxia, Sun Yuwen. Design on system of acquisition and wireless transmission for farmland image [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 184 ~ 187. (in Chinese)
  - 17 韩安太, 何勇, 陈志强, 等. 基于无线传感器网络的茶园分布式灌溉控制系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 173 ~ 180.  
Han Antai, He Yong, Chen Zhiqiang, et al. Design of distributed precision irrigation control system based on wireless sensor network for tea plantation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 173 ~ 180. (in Chinese)

(上接第 197 页)

#### 参 考 文 献

- 1 刘梅森, 何唯平, 陈胜利. 魔芋胶、琼脂及他拉胶对软冰淇淋品质影响研究[J]. 中国乳品工业, 2005, 33(11): 17 ~ 20.  
Liu Meisen, He Weiping, Chen Shengli. Study on the influence of knojac gum, agar and tara gum on soft-serve ice cream quality [J]. China Dairy Industry, 2005, 33(11): 17 ~ 20. (in Chinese)
- 2 Khalloufi S, Corredig M, Alexander M, et al. Flaxseed gums and their adsorption on whey protein-stabilized oil-in-water emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 611 ~ 618.
- 3 倪培德, 张建华, 江志炜, 等. 提高含胶亚麻蛋白乳化性能的机理初探[J]. 中国粮油学报, 1998, 13(4): 11 ~ 13.  
Ni Peide, Zhang Jianhua, Jiang Zhiwei, et al. Probing into the mechanism on improving the emulsifying properties of linseed protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1998, 13(4): 11 ~ 13. (in Chinese)
- 4 陈海华, 许时婴, 王璋. 亚麻籽胶化学组成和结构的研究[J]. 食品工业科技, 2004, 25(1): 103 ~ 105.
- 5 Phillips G O. Gum and stabilizer for the food industry [M]. Oxford: Pergamon Press, 1983: 213 ~ 216.
- 6 Cui W, Mazza G. Physicochemical characteristics of flaxseed gum [J]. Food Research International, 1996, 29(3 ~ 4): 397 ~ 402.
- 7 Stewart S, Mazza G. Effect of flaxseed gum on quality and stability of a model salad dressing [J]. Journal of Food Quality, 2000, 23(4): 373 ~ 390.
- 8 Oomah B D. Flaxseed as a functional food source [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001, 81(9): 889 ~ 894.
- 9 Wang Y, Wang L J, Li D, et al. Effects of drying methods on rheological properties of flaxseed gum [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(2): 213 ~ 219.
- 10 Wang Y, Li D, Wang L J, et al. Rheological study and fractal analysis of flaxseed gum gels [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(2): 594 ~ 599.
- 11 汪立君, 吴敏, 王勇, 等. 豆渣-玉米粉挤压膨化分散体系流变特性[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 119 ~ 125.  
Wang Lijun, Wu Min, Wang Yong, et al. Rheological properties of extruded okara-maize blend based on extrusion technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 119 ~ 125. (in Chinese)