

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.041

水产养殖中复合精确自动增氧技术研究

蒋建明¹ 朱正伟¹ 李正明² 赵德安² 史兵¹

(1. 常州大学信息科学与工程学院, 常州 213164; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 提出了一种日常情况下利用耕水机改善水质和应急情况下采用叶轮增氧机增氧的复合自动增氧模式。耕水机通过太阳能电池驱动昼夜不停耕动水体, 不仅释放了底层水体有害物质, 而且通过水体中藻类的光合作用极大提高了整个水体溶解氧浓度, 大幅减少了叶轮增氧机应急增氧时间。水体溶解氧浓度通过 ZigBee 无线传感网络实时监控, 低于设定下限值时, 启动应急变频增氧, 高于上限时停止增氧, 控制方式采用增量式 PID 控制。试验结果表明, 复合增氧方式与单一增氧方式相比, 节省了约 65% 的电能、80% 的人力成本和 20% 的药品等, 总体利润增加 20% 以上。

关键词: 水产养殖; 叶轮增氧机; 耕水机; 自动精确增氧; 增量式 PID 控制

中图分类号: S969 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0334-06

Technology of Green Accurate Oxygen Enhancement in Aquaculture

JIANG Jianming¹ ZHU Zhengwei¹ LI Zhengming² ZHAO Dean² SHI Bing¹

(1. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

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

Abstract: High-density mode was widely adopted in China's aquaculture, and single manual control of the mechanical oxygenation mode was chosen. To ensure safety, an extensive over-anaerobic mode was used, but the security was still difficult to improve. Human resources and electricity were wasted. A new type of automatic oxygen enrichment model was proposed, which utilized a biofan to improve the water quality and increase oxygen in the case of an emergency. The biofan was driven by solar battery, which circulated water day and night. It not only released the harmful substances in the bottom water body, but also greatly improved the dissolved oxygen content of the whole water body through the photosynthesis of the algae in the water body. It led to a significant reduction in the impeller aerator time to oxygen. Through the comparison test, it was found that the variation of dissolved oxygen concentration in automatic control mode was less than that in single oxygenation model in 24 h. By measuring and analyzing the dissolved oxygen content at 0.6 m and 1.0 m below the water, it can be seen that the difference of dissolved oxygen content in the upper and lower layers in automatic control mode was smaller than that in the single control mode. It was mainly because the upper and lower water bodies continued to cycle in automatic control mode. The concentration of dissolved oxygen in water was monitored by ZigBee wireless sensor network in real time. When the dissolved oxygen concentration was lower than the set lower limit, impeller aerator was automatically activated, and when it was higher than the set upper limit, impeller aerator was stopped to achieve the purpose of accurate oxygen. Incremental PID control mode was adopted.

Key words: aquaculture; impeller aerator; biofan; accurate oxygen; incremental PID control

引言

我国是世界上最大的水产养殖国,传统的小规

模依靠自然条件养殖模式已逐步淘汰,高密度规模化养殖已成为一种趋势。节能减排、降低成本和提高水产品质量、满足人民群众日益增长的品质需求

收稿日期: 2017-03-29 修回日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61772090)、江苏省科技支撑计划项目(BE2013005-3)和常州市应用基础研究计划项目(CJ20159035)

作者简介: 蒋建明(1970—),男,副教授,博士,主要从事电气测量控制研究, E-mail: jjm-224@163.com

是众多养殖户不断追求的目标。

高密度水产养殖中保持水体溶解氧浓度稳定是稳产和高产的基础,为此许多养殖户不惜采用过量粗放式增氧确保安全,浪费了电能,但安全系数仍然不能有效提高。普遍采用手动控制单一机械增氧模式,增氧机械 80% 左右为叶轮增氧机,其他还有微孔曝气式、水车式等,其增氧效率相对低下。顾海涛等^[1]提出数字化、智能化控制是水产养殖增氧技术的发展趋势。张世羊等^[2]提出依据不同增氧机械的特点,白天宜采用耕水机工作,夜晚增氧宜采用叶轮增氧机。本文提出一种采用无线传感网络实时监测水体溶解氧浓度,耕水机昼夜不停耕动水体改善水质和应急情况下采用叶轮增氧机变频增氧的绿色精确增氧模式。

1 系统结构

系统结构如图 1 所示,每个养殖池增氧设备由 1 台叶轮增氧机和 1 台由太阳能电池供电的昼夜不停耕动水体的耕水机组成。水体溶解氧浓度通过 ZigBee 无线传感网络传输到每个养殖池的基站,基站通过串行通信传输给控制器 CPU,CPU 根据系统设定上、下限值控制叶轮增氧机启动和停止。

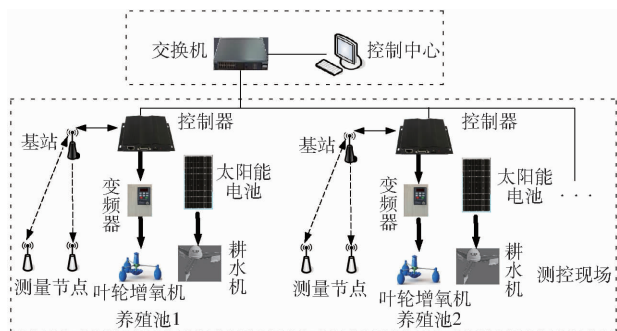


图 1 系统硬件结构图

Fig. 1 Structure of system hardware

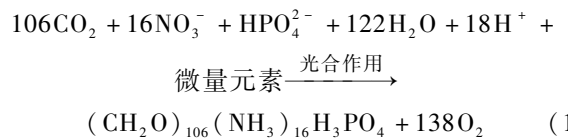
2 增氧控制

系统增氧主要分为太阳能驱动耕水机绿色增氧和电力驱动叶轮增氧机应急增氧。

2.1 耕水机的绿色增氧

耕水机功率一般分为 25、40、60 W,它利用流体力学的原理,以极低的功耗驱动养殖池水体大范围循环运动。工作时耕水机附近表层水面由中心向四周缓缓扩散流动,底层水体源源不断提升补充。整个养殖池以耕水机为中心形成涌升流,表层水和底层水不断循环置换^[3-4]。主要作用有:有效消除底层水体中氨氮、亚硝酸盐、硫化氢等有害物质,对沉积的残饵、排泄物等分解,同时溶解氧浓度低的底层水体循环到表层,有利于空气中的氧气扩散溶入水

中。根据研究报道^[3-7],藻类的光合作用



是增加水体溶解氧浓度的主要途径,在无增氧措施的情况下,占到 90% 左右。藻类原生质的碳、氮、磷 3 种元素按平均原子个数比为:C:N:P = 106:16:1。藻类对营养要素的吸收也是按照这个比例进行的。

藻类在光合作用的过程中不仅吸收水中大量 CO_2 和产生 O_2 ,同时吸收了氮磷,净化了水体。耕水机驱动水体上下循环使整个水体中的藻类都有机会进行光合作用达到富氧状态。节省了叶轮增氧机电力增氧时间,节约了电能。水体的循环流动促进了藻类和浮游生物的生长,成为鱼虾的天然饵料,减少了饵料的投放^[8-12]。但耕水机的应急增氧能力弱小,需要其他机械应急增氧^[13-15]。

2.2 叶轮增氧机的精确增氧

叶轮增氧机是在 20 世纪 70 年代研制成功的渔业增氧机械,至今仍然是我国最主要的机械增氧设备。它具有搅水、增氧、混合和曝气的作用。按功率一般分为 0.75、1.5、3 kW,具有构造简单、成本低廉和维护方便等优点^[16-21]。

2.2.1 增氧效果分析

空气中的氧气从混合液的气相一侧扩散到液相一侧,气相一侧中氧气浓度比液相一侧的浓度越大,则扩散的速度越快,当二者相近时,增氧效率低。空气中氧气向水体中扩散的规律可以用菲克(Fick)定律描述

$$V_d = -D_L \frac{dC}{dX} \quad (2)$$

式中 V_d ——物质的扩散速度

D_L ——扩散系数

C ——当前扩散物质浓度

X ——扩散过程长度

dC/dX ——单位长度内的浓度变化量,即扩散浓度的梯度

再根据刘易斯(Lewis)和怀特曼(Whitman)创立的双膜理论

$$V_d = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

式中 M ——单位时间 t 内扩散物质通过扩散界面的数量

A ——扩散界面面积

把式(3)代入式(2)得到

$$\frac{dM}{dt} = -D_L A \frac{dC}{dX} \quad (4)$$

由图2可知:①在扩散界面两侧的气相一侧和液相一侧存在层流状态的液膜和气膜,液相及气相主体分别处在外侧。液相和气相主体处于紊流状态。而气体分子需要以分子状态分别通过气膜和液膜,然后融入液相主体。②在机械增氧过程中,增氧的速度主要取决于氧分子通过扩散界面液膜的速度。③液相中氧分子的浓度梯度和气膜中氧分子分压梯度是氧气扩散的主要推动力。④扩散界面两侧存在紊流状态气相主体和液相主体,两种主体内物质浓度均匀,基本没有传质阻力和浓度差。气体分子扩散的阻力主要存在于气膜和液膜中。

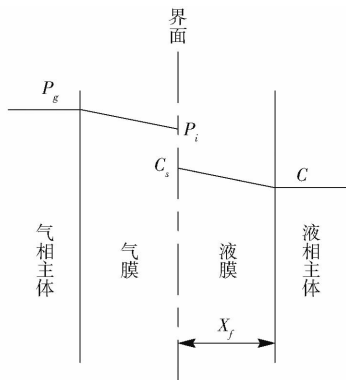


图2 双膜扩散理论模型

Fig. 2 Two-film diffusion theory model

在增氧过程中,氧气溶入水中的阻力在空气和水接触的液膜上,氧分子通过液膜的转移速度就是氧气溶入水中的控制速度。在液膜溶解氧浓度梯度为

$$-\frac{dC}{dX} = \frac{C_s - C}{X_f} \quad (5)$$

式中 X_f ——液膜厚度

C_s ——空气与液面交界处的溶解氧浓度

把式(5)代入式(4)得

$$\frac{dM}{dt} = D_L A \frac{C_s - C}{X_f} \quad (6)$$

由式(6)可知,为了提高氧气向水体的传递速率 dM/dt ,可以考虑以下因素:①提高气膜和液膜界面处的溶解氧浓度 C_s ,如采用纯氧增氧(成本太高)。②降低液膜厚度 X_f ,如加速气、液面的更新。③增加气、液接触面积。同时还可以发现当前水体溶解氧浓度 C 接近 C_s 时,二者的差值极小,此时增氧效率低,因此当水体溶解氧浓度高时,继续增氧效率比较低。

为了在水体溶解氧浓度低于下限值时及时启动叶轮增氧机精确增氧和避免在高于设定上限值时低效增氧,必须对水体溶解氧浓度实时监测。

2.2.2 水体溶解氧浓度无线监测

养殖池水体溶解氧监测如果采用有线监测需要

架设电缆,成本高且影响养殖池其他作业,因此采用 ZigBee 无线通信监测(图3),协议采用低能量自适应分群分层路由协议(Low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)。



图3 溶解氧传感器及 ZigBee 模块

Fig. 3 Dissolved oxygen sensor and ZigBee module

水体溶解氧浓度变化惯性系数大,测量节点向基站发送测量数据的周期较长。测量过程中由于多种原因引起个别时间测量数据失常,明显偏离实际值,这种粗大误差歪曲了测量结果,在测量控制一体化系统中,如不及时删除容易导致控制系统的混乱。

当测量次数多时,可以通过莱特准则删除粗大误差测量值;当测量次数较少时,测量值误差分布偏离正态分布,大致成 t 分布,可以采用肖维涅准则(表1)。

表1 肖维涅系数

Tab.1 Shawley coefficients

n	6	7	8	9	10	11	12	14	16	18
$c(n)$	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.00	2.07	2.10	2.15	2.20

假设某节点在一个数据发送周期内感知溶解氧质量浓度为: $y_0 = 5.01$ mg/L, $y_1 = 5.08$ mg/L, $y_2 = 5.12$ mg/L, $y_3 = 5.03$ mg/L, $y_4 = 4.95$ mg/L, $y_5 = 5.36$ mg/L, $y_6 = 4.92$ mg/L, $y_7 = 4.98$ mg/L, $y_8 = 5.11$ mg/L, $y_9 = 4.95$ mg/L。

则:求得: $\bar{y} = 5.05$ mg/L, $\sigma = 0.129$ mg/L, 根据 $n = 10$ 查表1得到 $c(n) = 1.96$, 可以求得

$$v = \sigma c(n) = 0.129 \times 1.96 = 0.253 \text{ mg/L}$$

$$y_5 - \bar{y} = 5.36 - 5.05 = 0.31 \text{ mg/L} > 0.253 \text{ mg/L}$$

认为 y_5 是粗大误差,应该删除。删除后重新计算:

$\bar{y} = 5.017$ mg/L, $\sigma = 0.073$ mg/L, 根据 $n = 9$ 查表1得到 $c(n) = 1.92$, 可以求得

$$v = \sigma c(n) = 0.073 \times 1.92 = 0.140 \text{ mg/L}$$

而此时最大绝对误差为

$$|y_6 - \bar{y}| = |4.92 - 5.017| = 0.097 \text{ mg/L} <$$

$$0.140 \text{ mg/L}$$

则系统认为已不存在粗大误差,则测量均值为 5.017 mg/L, 在规定时间内向基站发送。

为了保证测量的客观性和安全性,根据实际情况,每个养殖池可以安置多个测量节点,基站求取平

均值后传输给 CPU。

2.2.3 增量式 PID 控制增氧

从降低成本角度考虑,溶解氧应急变频增氧不适合采用复杂算法控制,要求控制稳定、简单高效,特殊情况下,从变频增氧模式人工切换到工频增氧模式达到无扰动切换,增量式 PID 控制能够满足上述要求。离散的 PID 控制为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d (e(k) - e(k-1)) \quad (7)$$

式中 $u(k)$ ——控制器输出

$e(k)$ ——控制器输入,是设定值与被控量之差

k_p ——比例放大系数

k_i ——积分系数 k_d ——微分系数

增量式 PID 数字控制器的输出是控制量的增量 $\Delta u(k)$,可以采用硬件或软件方法实现,本系统采用软件算法实现,依据式(7)可以得到

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) =$$

$$k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d (\Delta e(k) - \Delta e(k-1)) \quad (8)$$

其中 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

代入式(8)得到

$$\Delta u(k) = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (9)$$

其中 $A = k_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}\right)$

$$B = k_p \left(1 + \frac{2T_d}{T}\right) \quad C = \frac{k_p T_d}{T}$$

式中 T_i ——积分时间 T_d ——微分时间

T ——运行时间

当采样周期确定后,选定 k_p 、 T_i 、 T_d 后,则 A 、 B 、 C 系数确定,系统获取测量的 3 次误差就可确定增量式 PID 的输出的变化量 $\Delta u(k)$ 。

3 试验结果与分析

选择 4 个 100 m × 80 m 的养殖池,主要以四大家鱼养殖为主,1 号和 2 号养殖池采用太阳能驱动 40 W 耕水机和电力驱动 3 kW 叶轮增氧机的复合自动增氧模式,控制装置如图 4 所示,耕水机通过 200 W 的太阳能电池组件供电。3 号和 4 号养殖池采用单一手动控制 3 kW 叶轮增氧机模式。养殖周期为 2 a。自动增氧时 PID 控制参数 T 为 10 s, k_p 为 20, T_i 为 1 min, T_d 为 5 s。水体溶解氧浓度测量深度为水面下 0.6 m 处,当浓度低于 5.0 mg/L 时,叶轮增氧机启动,开始变频增氧;当大于 6.5 mg/L 时停止增氧。启动后,增氧目标设定值为 5.5 mg/L。单一增氧模式开启时间为夏季晚上 20:00 至第 2 天早上 08:00,阴雨天全天开机,冬季不开机,采用工频增氧。夏季某天测量得到溶解氧浓度变化

如图 5 所示。

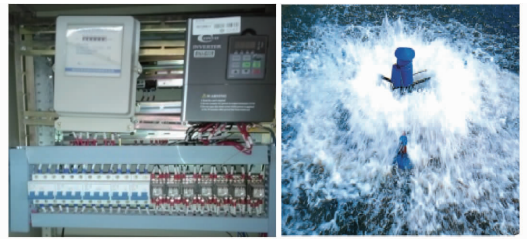


图 4 变频控制装置及叶轮增氧机工作图
Fig. 4 Frequency control device and impeller aerator working diagrams

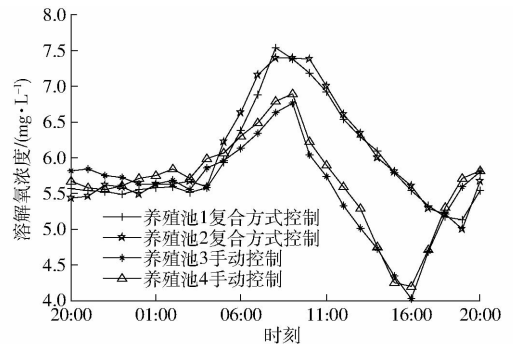


图 5 溶解氧浓度变化曲线

Fig. 5 Variation curves of dissolved oxygen concentration

由图 5 可知,复合方式控制养殖池水体溶解氧质量浓度大部分时间稳定在 5.5 mg/L,达到了精确增氧的目的;在 09:00—17:00 之间,耕水机工作使养殖池水体上下交换,上下层水体中的藻类都有机会通过光合作用储备溶解氧,达到了绿色增氧效果。单一增氧模式养殖池溶解氧浓度变化较大,在叶轮增氧机开启前达到了最低值,而且溶解氧浓度下降速度快,主要是因为白天由于藻类的光合作用仅增加了上层水体溶解氧浓度,虽然上层水体溶解氧浓度过饱和,但中下层水体由于不能上下循环,养殖池溶解氧整体浓度仍然较低。

通过测量水面下 0.6 m 和 1.0 m 处的溶解氧浓度,得到差值变化如图 6 所示。

由图 6 可知,单一增氧方式叶轮增氧机在 08:00 左右停止工作后溶解氧浓度逐渐产生了阶跃

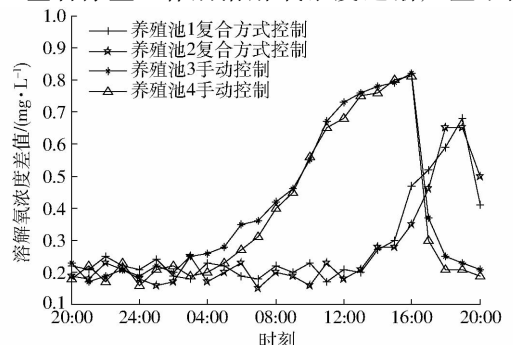


图 6 溶解氧浓度差值变化曲线

Fig. 6 Variation curves of dissolved oxygen concentration difference

分层,一直到 20:00 左右重新启动才消除分层。而复合增氧方式由于耕水机不停循环耕动水体,大部分时间消除了溶解氧的阶跃分层,只有在 20:00—23:00 左右短暂分层,优化了鱼虾的生长环境。

各养殖池成本、利润如表 2 所示,在规模化水产养殖中,虽然采用复合增氧方式硬件初期投入大于单一增氧方式,但总体利润仍大于单一增氧方式,而且前期的投入可以继续使用,减少了下期硬件投入。

表 2 各养殖池投入成本、利润统计
Tab. 2 Statistics of cost and profit of each pool

元

养殖池	饲料	耗电量	幼苗	机电设备	人力	场地租金、药品等	总成本	产值	利润
1(复合增氧)	4 500	948	6 000	13 000	600	8 200	33 248	104 512	71 264
2(复合增氧)	4 500	996	6 000	13 000	600	8 200	33 296	101 408	68 112
3(单一增氧)	6 000	2 927	6 000	4 500	3 000	10 300	32 727	89 175	56 448
4(单一增氧)	6 000	2 842	6 000	4 500	3 000	10 300	32 642	88 440	55 798

4 结束语

对太阳能电池绿色驱动耕水机改善水质和变频精确控制叶轮增氧机应急增氧进行了试验,试验结果表明,复合增氧方式虽然初期投资较多,但增氧效

率好,节省了人力与电力资源,与单一增氧方式相比节省了约 65% 的电能、80% 的人力成本和 20% 的药品等,虽然机电设备投资增加了约 1.89 倍,但总体利润增加 20% 以上。

参 考 文 献

- 顾海涛,王逸清. 我国池塘增氧技术现状与发展趋势[J]. 渔业现代化,2014,41(5):65-68.
GU Haitao, WANG Yiqing. The development status, issues and trends of pond aeration technology in China [J]. Fishery Modernization, 2014,41(5):65-68. (in Chinese)
- 张世羊,李谷,陶玲,等. 不同增氧方式对精养池塘溶氧的影响[J]. 农业工程学报,2013,17(9):169-175.
ZHANG Shiyang, LI Gu, TAO Ling, et al. Impact of different aeration approaches on dissolved oxygen for intensive culture ponds [J]. Transactions of the CSAE, 2013,17(9):169-175. (in Chinese)
- 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)
- 庞云芝,李秀金. 水-空气引射式冰下深水增氧机的设计与性能实验研究[J]. 农业工程学报,2003,19(3):112-116.
PANG Yunzhi, LI Xiujin. Design of water-air spurring aerator used under ice and in deep water and experimental study on its performance [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3):112-116. (in Chinese)
- 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)
- 丁翔文,张树阁,孙新超,等. 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, et al. Experimental study on applying biofan to cultivate *Penaeus vannamei* [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8):130-135. (in Chinese)
- 马从国,赵德安,秦云,等. 基于现场总线技术的水产养殖过程智能监控系统[J]. 农业机械学报,2007,38(8):113-115.
MA Congguo, ZHAO De'an, QIN Yun, et al. Intelligent monitoring and control for aquaculture process based on fieldbus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8):113-115. (in Chinese)
- 杨玮,吕科,张栋,等. 基于 ZigBee 技术的温室无线智能控制终端开发[J]. 农业工程学报,2010,26(3):198-202.
YANG Wei, LU Ke, ZHANG Dong, et al. Development of wireless intelligent control terminal of greenhouse based on ZigBee [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(3):198-202. (in Chinese)
- 宋佳,彭宇,彭喜元,等. 基于簇内数据聚内算法的 WSNs 故障检测方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(10):2214-2219.
SONG Jia, PENG Yu, PENG Xiyuan, et al. Fault detection technique based on clustering in WSNs [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(10):2214-2219. (in Chinese)
- 成小良,邓志东. 基于 ZigBee 规范构建大规模无线传感器网络[J]. 通信学报,2008,29(11):158-164.
CHEN Xiaoliang, DENG Zhidong. Construction of large-scale wireless sensor network using ZigBee specification [J]. Journal on Communications, 2008,29(11):158-164. (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)

- 12 刘兴国,刘兆普,王鹏祥,等. 基于水质监测技术的水产养殖安全保障系统及应用[J]. 农业工程学报,2009,25(6):186-191.
LIU Xingguo, LIU Zhaopu, WANG Pengxiang, et al. Aquaculture security guarantee system based on water quality monitoring and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6):186-191. (in Chinese)
- 13 朱明瑞,曹广斌,蒋树义,等. 工厂化水产养殖溶解氧自动监控系统研究[J]. 大连水产学院学报,2007,22(3):226-230.
ZHU Mingrui, CAO Guangbin, JIANG Shuyi, et al. Automatic monitoring and control system of dissolved oxygen levels in recirculating aquaculture[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2007, 22(3): 226-230. (in Chinese)
- 14 高峰,俞立,张文安,等. 基于无线传感网络的作物水份状况监测系统研究与设计[J]. 农业工程学报,2009,25(2):107-112.
GAO Feng, YU Li, ZHANG Wen'an, et al. Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2):107-112. (in Chinese)
- 15 袁凯,庄保陆,倪琦,等. 室内工厂化水产养殖自动投饲系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(3):169-176.
YUAN Kai, ZHUANG Baolu, NI Qi, et al. Design and experiments of automatic feeding system for indoor industrialization aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(3):169-176. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 顾海涛,何康宁,何雅萍. 耕水机的性能及应用效果研究[J]. 渔业现代化,2010,37(4):40-44.
GU Haitao, HE Kangning, HE Yaping. Research on function and application of biofan[J]. Fishery Modernization, 2010,37(4): 40-44. (in Chinese)
- 18 石礼娟,卢军. 基于随机森林的玉米发育程度自动测量方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):169-174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170122&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.022.
SHI Lijuan, LU Jun. Automatic measurement method for maize ear development degree based on random forest [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):169-174. (in Chinese)
- 19 李震,王宁,洪添胜,等. 农田土壤含水率监测的无线传感器网络系统设计[J]. 农业工程学报,2010,26(2):212-217.
LI Zhen, WANG Ning, HONG Tiansheng, et al. Design of wireless sensor network system based on in-field soil water content monitoring [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 212-217. (in Chinese)
- 20 WEST R W, PAULSON W L. Jet aeration in activated sludge system[J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1969, 41(10): 164-167.
- 21 宁静红,刘圣春,严雷. 太阳能蔬菜生产配送基地组合系统[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(9):131-135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120925&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.025.
NING Jinghong, LIU Shengchun, YAN Lei. Combined system of solar energy vegetable growth and distribution center [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):131-135. (in Chinese)

(上接第 318 页)

- 16 PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 17 BOULARD T, WANG S, HAXAIRE R. Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in an empty greenhouse tunnel [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(2-3): 169-181.
- 18 BOURNET P E, BOULARD T. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses; a review of experimental and CFD studies [J]. Biosystems Engineering, 2010, 74(2): 195-217.
- 19 RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46-47: 145-153.
- 20 WIERINGA J. Updating the davenport roughness classification [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1-3): 357-368.
- 21 MIGUEL A F. Airflow through porous screens: from theory to practical considerations [J]. Energy and Building, 1998, 28(1): 63-69.
- 22 WILSON N R, SHAW R H. A higher order closure model for canopy flow [J]. Journal of Applied Meteorology, 1977, 16(11): 1197-1250.
- 23 MOLINA-AIZ F D, VALERA D L, ALVAREZ A J, et al. A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(4): 447-457.
- 24 HAXAIRE R. Caracterisation et modelisations des ecoulements d'air dans une serre [D]. Nice: Université de Nice Sophie Antipolis. Faculté des Sciences, 1999.
- 25 BOULARD T, WANG S. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1-3): 173-190.
- 26 CAMPBELL G S. An introduction to environment physics[M]. New York: Springer, 1977.
- 27 BOULARD T, BAILLE A, MERMIER M, et al. Modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre [J]. Agronomie, 1991, 11(4): 259-274.