

水产养殖复合式自动增氧系统设计与试验

蒋建明^{1,2} 乔增伟¹ 朱正伟¹ 宦娟¹ 史兵¹ 郇战¹

(1. 常州大学微电子与控制工程学院, 常州 213164; 2. 常州大学怀德学院, 靖江 214500)

摘要: 针对我国规模化、高密度化水产养殖中机械增氧方式单一和增氧效率偏低的问题, 提出利用耕水机白天以低功率驱动养殖池水体上下循环, 促进各层水体中的藻类循环到上层, 通过光合作用大幅度提高水体溶解氧含量, 以减少其他增氧机械应急增氧。分析了溶解氧含量测量节点对测量误差的二次抛物线自修正, 进行了可变因子与固定因子模糊变频增氧控制、复合增氧与单一机械增氧的对比试验。通过试验发现, 可变因子模糊变频控制可更快提高水体溶解氧含量, 在额定区域内更稳定; 在晴朗白天、无应急增氧情况下, 复合增氧模式下养殖池水体溶解氧分布不仅上下层均匀, 而且整个水体吸收了更多藻类光合作用产生的氧气; 在应急增氧情况下, 复合增氧模式下养殖池不仅各层水体溶解氧含量得到提高, 而且耕水机驱散了叶轮增氧机附近的高溶解氧含量水体, 有利于提高增氧机效率。试验表明, 复合增氧模式下晴天单个养殖池每天节约电能 7.80 kW·h, 第3季度节约电能 587.34 kW·h, 表明水产养殖中复合式机械增氧有利于节约电能。

关键词: 水产养殖; 复合增氧; 耕水机; 叶轮增氧机

中图分类号: S969

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)10-0278-06

OSID:



Design and Test of Compound Mechanical Automatic Aeration in Aquaculture

JIANG Jianming^{1,2} QIAO Zengwei¹ ZHU Zhengwei¹ HUAN Juan¹ SHI Bing¹ HUAN Zhan¹

(1. School of Microelectronics and Control Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China

2. Huaide College, Changzhou University, Jingjiang 214500, China)

Abstract: Large-scale and high-density is the development trend of aquaculture in China. The impeller aerator is the most important aerators for aquaculture in China, with a market share of over 80%. The biofan is an aeration machine introduced from Japan in recent years. It can circulate the water up and down with low power during the day, and the photosynthesis of algae in the water can greatly increase the dissolved oxygen concentration of the water. However, it was difficult for biofan to play the role of aeration in rainy days or at night, so it must be used together with other aeration machines. Variable factor and fixed factor fuzzy frequency conversion aeration control of impeller aerators was first studied. Through the experiment, it was found that the variable factor fuzzy frequency conversion control improved the dissolved oxygen concentration of the water body faster and the control was more stable in the rated area. Subsequently, the simultaneous operation of the biofan and impeller aerator was analyzed. In this working mode, the distribution of dissolved oxygen in the water of the breeding pond was not only uniform on the upper and lower layers, but also the whole water body absorbed more oxygen produced by algae photosynthesis. The biofan dispersed the water body with high dissolved oxygen content near the impeller aerator to improve the working efficiency of the impeller aerator. The combined use of biofan and impeller aerator can save 7.80 kW·h of electricity per day on sunny days and save 587.34 kW·h in the third quarter.

Key words: aquaculture; compound aeration; biofan; impeller aerator

收稿日期: 2020-05-25 修回日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61772090)和国家自然科学基金青年基金项目(61803050)

作者简介: 蒋建明(1970—),男,副教授,博士,主要从事农业电气测控研究, E-mail: jjm-224@163.com

0 引言

水体溶解氧含量指溶解于每升水体中氧气的质量,是高密度水产养殖中最重要的水质参数之一^[1-2]。当水体溶解氧含量低于正常值时,鱼类对饵料摄取减少,饵料系数增加^[3-5]。当水体溶解量含量低于下限值时,会造成鱼类“浮头”,甚至大面积窒息死亡。目前,我国水产养殖密度普遍高,仅靠自然界溶入水体的氧气无法满足鱼类生长需求。

电力驱动叶轮式增氧(功率一般为 0.75、1.5、3 kW)是当前水产养殖增氧的主要方式^[6-10]。耕水机(40、60 W)是一种白天以低功率驱动水体上下循环、通过水体中藻类的光合作用大幅增加水体溶解氧浓度的间接增氧机械,但耕水机在阴雨天或夜晚难以收到增氧效果^[11-14]。文献[15-17]对微孔曝气增氧机与叶轮增氧机的增氧能力进行了对比研究,指出叶轮增氧机比同等功率微孔曝气增氧机增氧效果更佳。文献[18-20]在矩形养殖池对曝气增氧机与水车式增氧机的增氧效率进行了对比试验,发现曝气式增氧机耗费更多电能。文献[21]提出,为了提高水车式增氧机的增氧效率,必须实时获取水体溶解氧含量,以便在溶解氧含量低于下限值时进行增氧。文献[22-26]提出,水车式增氧机有利于改善养殖池水质参数,降低鱼类死亡率。

本文将叶轮增氧机和耕水机复合使用,分析采用可变因子模糊控制变频应急增氧效果,通过对养殖池水体不同区域、不同位置的溶解氧含量均匀度分析,探索高效节能的增氧方式。

1 系统结构

复合式增氧系统结构如图 1 所示,养殖池中水体溶解氧质量浓度由溶解氧传感器测量后传输给基站,近距离节点直接无线发送给基站,远距离节点由附近几个节点形成一个簇,由簇首汇总数据,打包发送给基站,为使各节点能耗均衡,簇首由各节点轮流担任。基站收集各节点测量数据,通过 RS-485 串行通信传送到控制器,控制器处理各节点测量数据,比较系统设定的应急增氧上限值(停止应急增氧)和下限值(启动应急增氧)停止和启动叶轮增氧机应急增氧,同时每天定时控制耕水机耕动水体。

1.1 溶解氧含量测量

1.1.1 测量节点

水体溶解氧含量测量节点结构如图 2 所示,由测量探头和信号处理两部分组成。

测量探头一般采用克拉克型传感器,该传感器由一个选择性薄膜封闭的充满电解液的腔室组成。

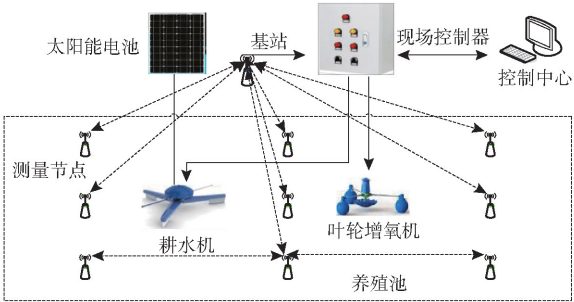


图 1 复合式增氧系统结构示意图

Fig.1 System structure diagram of compound aeration system

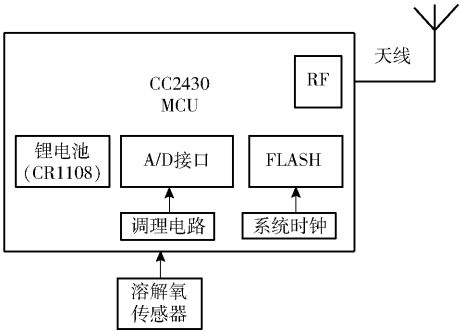


图 2 测量节点结构图

Fig.2 Structure of measurement node

腔室由阴极、阳极组成,二者之间充满氯化钾电解液,当阴阳两极之间由外接电池施加 0.8 V 电压时释放电子,电子在电解液中的定向流动形成电流,该电流与水体溶解氧质量浓度呈近似比例关系。

信号处理主要完成传感器信号的放大、A/D 转换,数据处理以及信号发射。普通节点采用锂电池供电;用作基站的节点,数据运算工作量大,能耗相应增加,所以固定在养殖池岸边采用电源供电。

1.1.2 测量误差的修正

各节点获取测量数据后,需要修正各组测量数据,计算出各测量点溶解氧质量浓度。

水体溶解氧传感误差修正的关键是建立误差模型。水体溶解氧质量浓度 V_i 与传感器输出电流 I_i 无确定误差模型,需要系统通过初始化现场测量建立模型。高次多项式模型可以精确模拟变化曲线。

假设有 n 组测量数据: $(I_1, V_1), (I_2, V_2), \dots, (I_n, V_n)$, 函数 $V_i = f(I_i)$ 满足系统要求,输出曲线可以近似用 $n-1$ 次多项式表示

$$V_i = a_0 + a_1 I_i + a_2 I_i^2 + \dots + a_{n-1} I_i^{n-1} \tag{1}$$

则把 n 组测量数据代入式(1)得到

$$\begin{cases} V_1 = a_0 + a_1 I_1 + a_2 I_1^2 + \dots + a_{n-1} I_1^{n-1} \\ V_2 = a_0 + a_1 I_2 + a_2 I_2^2 + \dots + a_{n-1} I_2^{n-1} \\ \vdots \\ V_n = a_0 + a_1 I_n + a_2 I_n^2 + \dots + a_{n-1} I_n^{n-1} \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可求得 $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$ 。

理论上 n 越大,测量精度越高,但系统运算量随

之几何上升。受到测量节点 CPU 运算能力限制,系统采用二次抛物线插值法。在系统初始化阶段,选取 (I_1,V_1) 、 (I_2,V_2) 、 (I_3,V_3) 3 组数据代入式(2)得到

$$\begin{cases} V_1 = a_0 + a_1 I_1 + a_2 I_1^2 \\ V_2 = a_0 + a_1 I_2 + a_2 I_2^2 \\ V_3 = a_0 + a_1 I_3 + a_2 I_3^2 \end{cases} \quad (3)$$

由此求得 a_0 、 a_1 、 a_2 ,当测量过程中获取溶解氧传感器测量参数 I_i 时,则可求得

$$V_i = a_0 + a_1 I_i + a_2 I_i^2 \quad (4)$$

1.2 增氧机械

1.2.1 叶轮增氧机

叶轮增氧机主要由叶轮、撑杆、浮筒、电动机、减速箱等组成。其增氧原理是水跃、水面更新、负压进气等联合作用。

(1)水跃增氧。叶轮在水中旋转而产生离心力,中央产生负压区,将底层水提上来促使水从叶轮中央向四周甩出,产生水跃与水平流。

(2)水面更新增氧。由于叶轮的提水及甩水作用,使气水界面不断更新,将底层缺氧的水提至水体表面,使缺氧水与空气接触。

(3)负压进气增氧。叶轮旋转能在某些部位形成负压区,在每只叶片后部钻有一排小气孔利于负压进气,增加了溶氧效果。

1.2.2 耕水机

耕水机结构及工作图如图 3 所示,工作时以几十瓦的功率缓慢搅动水体,使水体上下层循环,促使空气中的氧气加快溶入水体,更重要的是循环到上层的溶解氧含量较低,水体中的藻类通过光合作用产生大量氧气溶入水体。在无耕水机工作情况下,上层水体溶解氧过饱和,光合作用产生的氧气只能溢出到空气中。

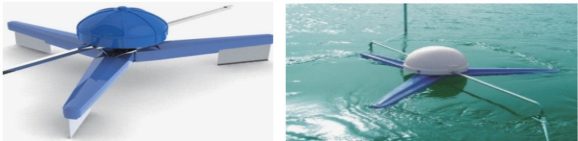


图 3 耕水机结构及工作图

Fig.3 Schematic diagram of biofan

1.3 模糊变频增氧控制

各测量节点把测量的有效参数传输给基站,基站把测量数据传送给控制器,当测量数据低于下限值(设定应急增氧启动值)时,控制器启动叶轮增氧机变频应急增氧。在应急增氧状态下,测量数据高于上限值(设定应急增氧停止值)时停止应急增氧,避免低效工作(水体溶解氧含量越高,应急增氧效率越低)。

控制器每次采样后获取的溶解氧含量误差 e 和

误差变化率 Δe 首先按照隶属函数归类为 $\{4,3,2,1,0,-1,-2,-3,-4\}$ 。

在固定因子模糊变频控制中,误差 e 和误差变化率 Δe 的加权系数均为 0.5。即

$$u = -(e + \Delta e)/2 \quad (5)$$

式中 u 为控制器输出量化值控制系数,如表 1 所示。

表 1 固定因子模糊变频控制系数

Tab.1 Fixed factor fuzzy frequency conversion control

e	Δe								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	4	4	3	3	2	2	1	1	0
-3	4	3	3	2	2	1	1	0	-1
-2	3	3	2	2	1	1	0	-1	-1
-1	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2
0	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2
1	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3
2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
3	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4
4	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4

增氧控制中当溶解氧质量浓度低于下限值时,要求迅速提高溶解氧质量浓度到额定值,所以对误差加权偏大;当接近额定值时,要求控制稳定,对误差变化率加权偏大。

$$u = \begin{cases} -[\alpha_1 e + (1 - \alpha_1) \Delta e] & (e = 0, \pm 1, \pm 2) \\ -[\alpha_2 e + (1 - \alpha_2) \Delta e] & (e = \pm 3, \pm 4) \end{cases} \quad (6)$$

式中加权系数 α_1 、 $\alpha_2 \in (0,1)$ 。系统中取 $\alpha_1 = 0.4$, $\alpha_2 = 0.6$,由此得到的实际控制系数 u 如表 2 所示。

表 2 可变因子模糊变频控制系数

Tab.2 Variable factor fuzzy frequency conversion control

e	Δe								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	4	4	3	3	2	2	2	1	1
-3	3	3	3	2	2	1	1	1	0
-2	3	2	2	1	1	0	0	-1	-2
-1	3	2	2	1	0	0	-1	-1	-2
0	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2
1	2	1	1	0	0	-1	-2	-2	-3
2	2	1	0	0	-1	-1	-2	-3	-3
3	0	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-3	-3
4	-1	-1	-2	-2	-2	-3	-3	-4	-4

由于 u 的值域是 $[-4,4]$,变频控制器的输入信号是 $[0\text{ V},5\text{ V}]$,则变频器输入信号为

$$U = 5u/8 + 2.5 \quad (7)$$

2 试验分析

2.1 模糊变频控制试验

在江苏省丹阳市横塘水产养殖基地分别选取

4 个 100 m×50 m×2 m 的养殖池,通过无线传感网络实时监测水面下 0.5 m 处水体溶解氧质量浓度,采用单一叶轮式增氧机(3 kW)变频增氧;其中 2 个养殖池采用固定因子模糊变频控制,另外 2 个养殖池采用可变因子模糊变频控制。应急增氧启动的下限值为 3.5 mg/L,增氧控制额定值为 5.5 mg/L,停止应急增氧的上限值为 6.5 mg/L。

由图 4 可知,采用可变因子模糊变频控制在 20:00 左右启动应急增氧时相比固定因子控制能快速增氧质量浓度至额定值,在额定值区域溶解氧质量浓度更稳定。

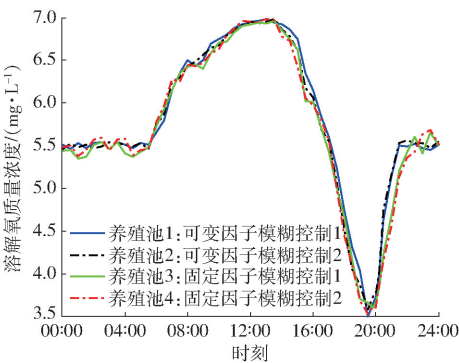


图 4 晴天模糊变频控制图

Fig. 4 Fuzzy variable frequency control chart on sunny days

由图 5 可知,阴雨天自然界产生的溶解氧无法满足高密度水产养殖鱼类需求,需要 24 h 通过变频控制增氧,采用可变因子模糊控制的溶解氧误差小于采用固定因子的变频控制。

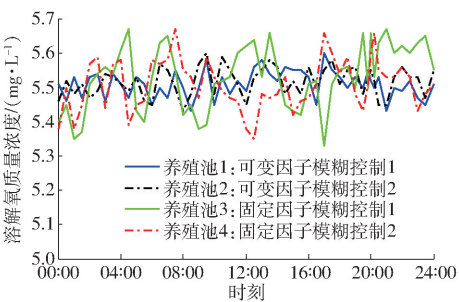


图 5 阴雨天模糊变频控制图

Fig. 5 Fuzzy variable frequency control chart on rainy days

2.2 无应急增氧与应急增氧对比试验

分别选取 2 个 100 m×50 m×2 m 的养殖池,均选用多点实时无线监测水体溶解氧质量浓度,一个采用单一叶轮式机械增氧模式;另一个采用耕水机定时工作(00:00—17:00)和叶轮增氧机复合增氧模式。二者应急增氧启动的下限值为 3.5 mg/L,控制额定值为 5.5 mg/L,停止应急增氧的上限值为 6.5 mg/L。

(1)无应急增氧溶解氧含量分布

在晴朗白天,养殖池一般无需应急增氧,水体溶解氧主要由藻类光合作用产生的氧气和大气中溶入

水体中的氧气补给。在水体上下层不循环情况下,上层水体溶解氧一般处于过饱和状态。在复合增氧模式中,耕水机不断驱动水体上下循环,保证上下层水体都能达到富氧状态,整体提升了水体溶解氧含量。在 14:00 左右通过测量获取养殖池水体溶解氧分布如图 6 所示,在耕水机工作中整个水体溶解氧分布相对均衡,底层水体(水面下 1.8 m)溶解氧质量浓度约为 4.6 mg/L,上层水体(水面下 0.2 m)约为 6.1 mg/L,阶层差约为 1.5 mg/L。在无耕水机工作的单一增氧机模式中,底层水体溶解氧质量浓度约为 3.0 mg/L,中层水体(水面下 1.0 m)溶解氧质量浓度约为 4.5 mg/L,上层水体约为 7.5 mg/L,部分表层水体(水面下 0.1 m)甚至超过 10.0 mg/L,上下阶层差约为 4.5 mg/L。

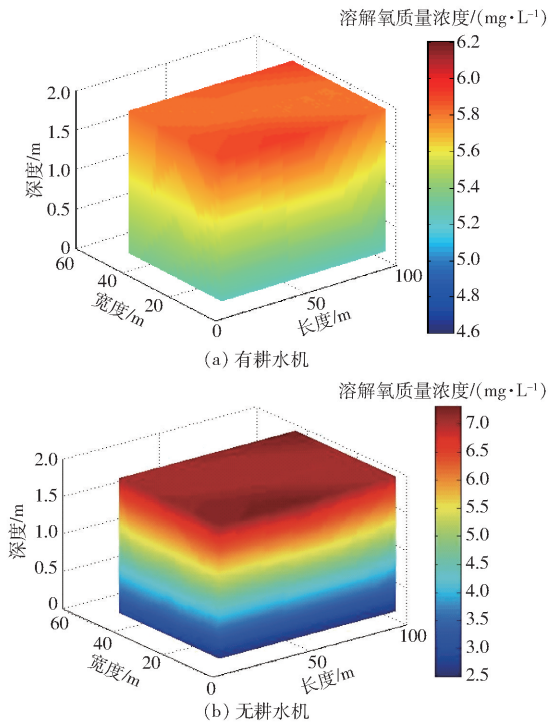


图 6 无应急增氧模式下水体溶解氧分布

Fig. 6 Dissolved oxygen distributions in water without emergency aeration

(2)应急增氧时溶解氧含量分布

在晴朗白天,养殖池水体溶解氧补给大于消耗,但在夜晚仅通过空气溶入水体得到少量补充,消耗大于补给。当水体溶解氧质量浓度低于下限时自动启动叶轮增氧机应急增氧。07:30 测量获取溶解氧质量浓度分布如图 7 所示。

在耕水机和叶轮增氧机同时工作的养殖池水体溶解氧分布中,各点质量浓度分布均匀。底层约为 5.5 mg/L,中层约为 6.0 mg/L,上层约为 6.5 mg/L。在叶轮增氧机单独工作的水体溶解氧分布中,增氧机工作区域上下层分布均匀,但远离增氧机区域中下层水体溶解氧质量浓度较低,部分区域质量浓度

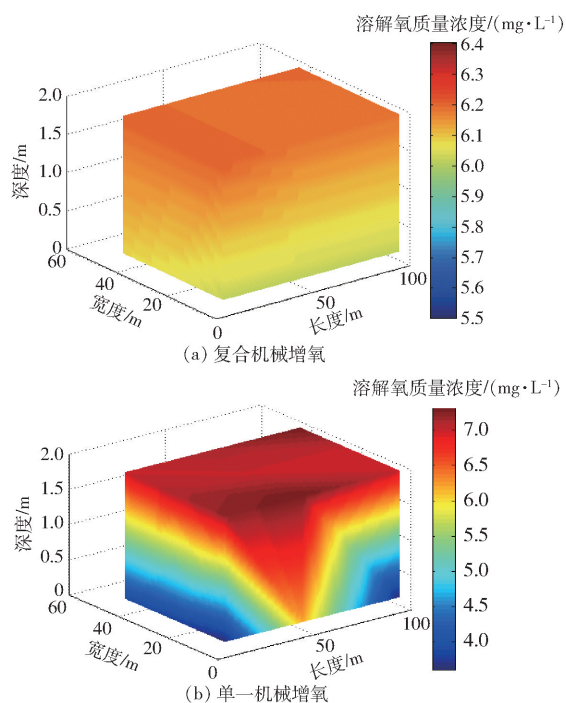


图7 应急增氧模式水体溶解氧分布

Fig.7 Distributions of dissolved oxygen in water during emergency aeration

约为 4.0 mg/L ,说明叶轮增氧机增氧难以搅动远距离区域。中心区域部分溶解氧质量浓度偏高,降低了增氧效率。

(3)效果分析

晴朗天气单一机械增氧和复合增氧模式中叶轮增氧机工作时间如图8所示。单一机械增氧模式中

叶轮增氧机启动时间约为 20:00,复合增氧模式中启动时间约为 23:00,停止时间都约为 08:00。复合增氧模式中叶轮增氧机工作时间减少了 3 h,功耗减少 $9 \text{ kW}\cdot\text{h}$,减去耕水机每天功耗约 $1.2 \text{ kW}\cdot\text{h}$,每天节约电能 $7.80 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。阴雨天试验发现单一机械增氧模式和复合增氧模式耗电量基本相等。经过第3季度试验发现,复合增氧模式比单一增氧模式节约电能 $587.34 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

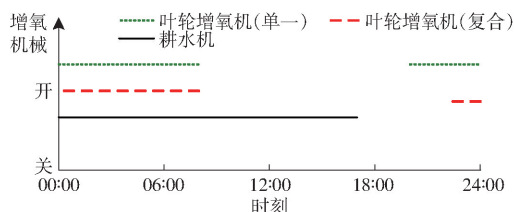


图8 增氧机械启停示意图

Fig.8 Schematic of start-stop of aeration machines

3 结论

(1)在无应急增氧情况下,单一增氧模式上下层水体溶解氧质量浓度差值约为 4.5 mg/L ,复合增氧模式约为 1.5 mg/L 。

(2)在应急增氧情况下,单一增氧模式区域水体溶解氧质量浓度差值约为 2.0 mg/L ,复合增氧模式约为 1.0 mg/L 。

(3)在晴天试验中,相比单一增氧模式,复合增氧模式节约电能 $28.2 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。第3季度复合增氧模式节约电能 $587.34 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

参考文献

- [1] 胡金有,王靖杰,张小栓,等.水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):251-263. HU Jinyou, WANG Jingjie, ZHANG Xiaoshuan, et al. Research status and development trends of information technologies in aquacultures[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 251-263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150737&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.037. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 朱成云,刘星桥,李慧,等.工厂化水产养殖溶解氧预测模型优化[J/OL].农业机械学报,2016,47(1):273-278. ZHU Chengyun, LIU Xingqiao, LI Hui, et al. Optimization of prediction model of dissolved oxygen in industrial aquaculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 273-278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160137&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.037. (in Chinese)
- [4] 金光,高子航,江先亮,等.基于低功耗广域网的海岛水产养殖环境监测系统研制[J].农业工程学报,2018,34(24):184-191. JIN Guang, GAO Zihang, JIANG Xianliang, et al. Development of island aquaculture environment monitoring system based on low-power wide area networks[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 184-191. (in Chinese)
- [5] 尹宝全,曹闪闪,傅泽田,等.水产养殖水质检测与控制技术研究进展分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(2):1-13. YIN Baoquan, CAO Shanshan, FU Zetian, et al. Review and trend analysis of water quality monitoring and control technology in aquaculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190201&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.001. (in Chinese)
- [6] 孟祥宝,黄家怿,谢秋波,等.基于自动巡航无人驾驶船的水产养殖在线监控技术[J/OL].农业机械学报,2015,46(3):276-281. MENG Xiangbao, HUANG Jiayi, XIE Qiubo, et al. Online monitoring equipment for aquaculture based on unmanned automatic cruise boat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 276-281. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150327&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.276. (in Chinese)

- csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150340&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 03. 040. (in Chinese)
- [7] 洪剑青, 赵德安, 孙月平, 等. 水产养殖无人导航明轮船运动仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 124 – 130. HONG Jianqing, ZHAO Dean, SUN Yueping, et al. Motion simulation and test of aquaculture unmanned navigation paddlewheel vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 124 – 130. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160318&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 03. 018. (in Chinese)
- [8] 雷宏军, 刘欢, 刘鑫, 等. 水肥气一体化灌溉对温室辣椒地土壤 N_2O 排放的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 262 – 270. LEI Hongjun, LIU Huan, LIU Xin, et al. Effects of oxyfertilization on soil N_2O emission under greenhouse pepper cropping system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 262 – 270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190328&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 03. 028. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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] 张净, 沈捷, 刘晓梅. 基于太阳能供电的行走式智能增氧机器人研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 340 – 345. ZHANG Jing, SHEN Jie, LIU Xiaomei. Realization of walking intelligence oxygenated robot based on solar power [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 340 – 345. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171242&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 12. 042. (in Chinese)
- [13] 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. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170122&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 022. (in Chinese)
- [14] 段青玲, 刘怡然, 张璐, 等. 水产养殖大数据技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 1 – 16. DUAN Qingling, LIU Yiran, ZHANG Lu, et al. State-of-the-art review for application of big data technology in aquaculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 1 – 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180601&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 06. 001. (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] NELLORE K, HANCKE G P. A survey on urban traffic management system using wireless sensor networks[J]. Sensors, 2016, 16(2): 157.
- [17] 郑思宁, 刘强, 郑逸芳. 规模化水产养殖技术效率及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 229 – 235. ZHENG Sining, LIU Qiang, ZHENG Yifang. Analysis of scale aquaculture production efficiency and analysis of its determinants [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 229 – 235. (in Chinese)
- [18] ITANO T, INAGAKI T, NAKAMURA C, et al. Water circulation induced by mechanical aerators in a rectangular vessel for shrimp aquaculture[J]. Aquacultural Engineering, 2019, 85: 106 – 113.
- [19] KUMAR A, MOULICK S, MAL B C. Selection of aerators for intensive aquacultural pond[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 56: 71 – 78.
- [20] DE MORAIS A P M, ABREU P C, WASIELESKY J W, et al. Effect of aeration intensity on the biofilm nitrification process during the production of the white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in Biofloc and clear water systems[J]. Aquaculture, 2020, 514: 734516.
- [21] BOYD C E, TORRANS E L, TUCKER C S. Dissolved oxygen and aeration in ictalurid catfish aquaculture[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2018, 49(1): 7 – 70.
- [22] JESCOVITCH L N, BOYD C E, WHITIS G N. Effects of mechanical aeration in the waste-treatment cells of split-pond aquaculture systems on water quality[J]. Aquaculture, 2017, 480: 32 – 41.
- [23] AKHTAR F, REHMANI M H. Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 769 – 784.
- [24] HE D, KUMAR N, CHEN J, et al. Robust anonymous authentication protocol for health-care applications using wireless medical sensor networks[J]. Multimedia Systems, 2015, 21(1): 49 – 60.
- [25] SRBINOVSKA M, GAVROVSKI C, DIMCEV V, et al. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88: 297 – 307.
- [26] OJHA T, MISRA S, RAGHUWANSHI N S. Wireless sensor networks for agriculture: the state-of-the-art in practice and future challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 66 – 84.