

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.032

# 集中式深水网箱群鱼群活动状态远程监测系统\*

张小康 许肖梅 彭阳明 洪华生

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005)

**【摘要】** 为克服离岸深水网箱群养殖水域环境和鱼群安全日常监测不便的问题,提出了一种集中式深水网箱群鱼群状态远程监测系统。采用水声多波束探测技术、多路信号处理技术设计了远程探测节点,用于扫描各深水网箱内部空间;采用虚拟仪器技术设计了本地监控中心,便于用户集中控制远程探测节点、查看网箱探测结果;采用GPRS无线数据传输技术构建了远程、实时的指令和数据传送通道。监测系统样机在福建省泉州市围头深水网箱养殖现场进行测试,结果表明:系统设计合理,操作方便,性能稳定、可靠,能够准确及时地反馈养殖环境变化情况和网箱鱼群状态,减轻养殖工作量。

**关键词:** 深水网箱群 远程监测系统 多波束探测 虚拟仪器

**中图分类号:** TP277; S967.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0178-05

## Centralized Remote Monitoring System for Bred Fish in Offshore Aquaculture Cage

Zhang Xiaokang Xu Xiaomei Peng Yangming Hong Huasheng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

### Abstract

In order to monitor the aquatic environment and fish state in offshore aquaculture cage farm daily, a centralized remote monitoring system for bred fish was developed. The system was composed of remote detecting node (RDN) and local monitor and control center (LMCC). RDN based on the techniques of multi-beam detection and multi-path signal process was placed in the center of a cage to scan the inner cage and measure the aquatic environment. LMCC based on LabVIEW was placed in the office to manage all the remote detecting nodes remotely and show fish state. The communication between LMCC and RDN depended on GPRS wireless data transmission technology. The system prototype was tested in the field of offshore aquaculture cage farm in Quanzhou, Fujian province. The results show that the system is reasonable design, simple operation, easy placement, and robust under different environmental conditions. It can real-time monitor the aquatic environment and fish activity remotely, provide users with a variety of information such as fish amount, fish growth in the offshore fish cage, and give an alarm in the time when net clothing damage or fish escape.

**Key words** Offshore aquaculture cage, Remote monitoring system, Multi-beam detection, Virtual instrument

### 引言

随着世界性渔业资源的匮乏,水产养殖在渔业生产中发挥的作用越来越显著。其中,深水网箱养

殖因其具有抗风浪能力强、高产高效、环保等优点,近年来在世界范围内得到广泛应用,成为高经济附加值鱼类养殖的重要方法。但是,相对于传统网箱养殖,深水网箱所处水域深、离岸距离远、鱼群

收稿日期:2012-01-04 修回日期:2012-02-22

\*国家自然科学基金资助项目(41176032)和中国博士后科学基金第五十批面上资助项目(2011M501082)

作者简介:张小康,博士后,主要从事水下声学探测研究,E-mail: xiaokang\_xmu@163.com

通讯作者:许肖梅,教授,博士生导师,主要从事水声遥测、遥控及水声通信研究,E-mail: xmxu@xmu.edu.cn

活动范围大,存在养殖水域环境、鱼群安全日常监测不便、事故发生(如网衣破裂、鱼群逃逸等)反馈滞后等问题,可能造成巨大的经济损失<sup>[1-3]</sup>。

针对上述问题,国内外专家和学者提出了基于不同监测方式的解决方案。以光学监测为主的系统,如我国中国水产科学研究院渔业机械研究所研制的多视角网箱监测器等;以声学监测为主的系统,如西班牙巴伦西亚大学等多家单位采用 EY500 型回波探测器研制的垂直方向网箱鱼群探测系统、我国农业部渔业装备与工程重点实验室等多家单位联合开发的球冠面多波束网箱监测系统等;采用声光相结合监测的系统,如麻省理工大学和 Woods Hole 海洋研究所研制的远程网箱监测系统等;此外,还有采用生物遥测技术对网箱养殖鱼群进行活动跟踪的方法,不过这些技术成本昂贵<sup>[4-8]</sup>。从网箱监测技术的发展趋势看,声学监测是主流研究方向,而光学监测虽然有成像直观的优势,但其存在的诸多缺点制约了它的应用:如光波在海水中衰减快,探测距离短,在混浊海域仅为 1~2 m,无法满足全网箱探测要求;夜间采用的人工光源不仅影响鱼类生长,还增加功耗;视频图像的远程传输问题等。分析目前已实现的声学监测系统,存在以下问题:完成一次全网箱扫描的时间太长,不能有效克服因游动鱼群重复探测造成的探测误差,如文献[7]中介绍的监测系统,声波束通过电动机带动旋转完成一次全网箱空间的扫描需要 3.5 min;仅针对单口深水网箱,没有涉及到聚集了几十甚至上百个养殖网箱的大型深水网箱养殖场的监测和管理。

本文提出一种基于环形水声多波束技术的集中式深水网箱群鱼群活动状态远程监测系统。该系统采用集中式控制模式,由一个本地监控中心控制多个远程探测节点实施网箱群监测;利用远程探测节点上安置在网箱中心水面下一定深度的环形多波束换能器对网箱内部进行快速的分区探测,采用节点上搭载的温度、浊度等传感器采集养殖水域的水质参数;再通过 GPRS 无线数据传输技术将探测数据回传到本地监控中心进行数字信号处理,并向用户反馈各网箱探测情况,当发现鱼群减少、环境污染等异常情况时,及时发出警报。

## 1 系统结构

监测系统采用集中式系统结构,由布设在岸站上的本地监控中心和每口深水网箱中心的远程探测节点组成,节点数量不限,且具有即插即用功能,因此系统具有良好的可扩展性,系统结构如图 1 所示。用户可通过本地监控中心直接控制或通过手机信号

间接控制某一远程探测节点实施网箱群探测;探测数据经本地监控中心处理后获得的探测结果,不仅可以由监控界面反馈给用户,也可以通过 GPRS 网络传送到用户手机上。

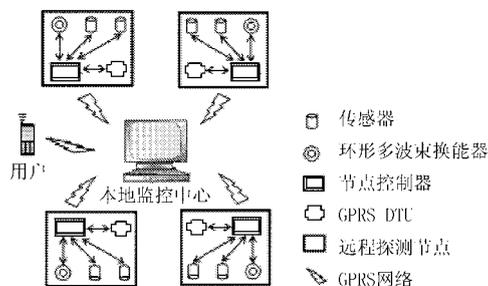


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Structure of system

## 2 远程探测节点

远程探测节点包含节点控制器、GPRS 数据传输单元(GPRS data transmission unit, 简称 GPRS DTU)和若干个网箱监测所需的探头。节点控制器是节点的逻辑控制中心,它通过 GPRS DTU 接收用户指令,作出相对应的控制操作,实现一个最大可扩展至 8 路的信号采样平台,将搭载在该节点上的各种探头输出信号转换为数字信号,通过 GPRS DTU 发送回本地监控中心。本系统搭载有环形多波束换能器、温度计、浊度计和 GPS 定位仪,用于实现网箱鱼群状态探测、养殖水域温度采集、简单的水质监测和网箱漂移后的定位。其中,利用环形多波束换能器监测网箱鱼群活动状态是本系统最基本的功能。

### 2.1 环形多波束换能器探测原理

深水网箱是空间封闭的养殖区域,养殖鱼群或静止或以不同速度环绕着网衣内壁游动。传统的声学监测方法会因声波束机械转动扫描网箱的速度与鱼群游速差异造成鱼群探测误差:当扫描速度小于鱼群游速时,部分或全部鱼群在全网箱扫描过程中游动超过一圈,被重复探测;当扫描速度与鱼群游速相近时,二者同步,声学探测可能只针对同一鱼群,探测结果无法反映出真实的鱼群分布。为克服上述问题,本系统提出采用固定安装的环形多波束换能器实施网箱扫描的方法,无需旋转波束就可以探测网箱内部的鱼群分布情况。设计的环形多波束换能器包含 8 个均匀分布、指向性图案相同、具有 50 kHz 和 200 kHz 双频工作的声波束。探测时,换能器通过安置在网箱中心处的浮标悬挂于水面下 2~3 m 处(根据网箱深度需要实时调整),图 2 所示为环形八波束换能器在 2 种不同工作频率下的探测示意图。

图 2a 表示换能器工作在 50 kHz 时,多波束实施网箱探测的示意图。该频率下,声束宽度均为

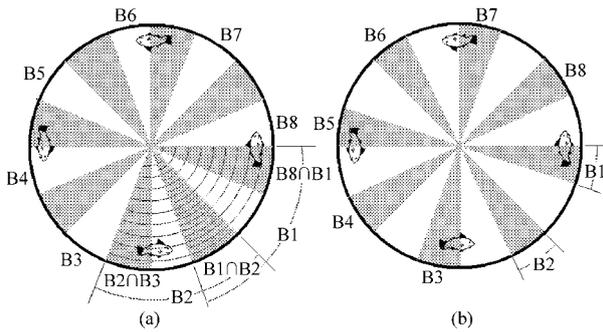


图2 不同工作频率的声波束探测示意图

Fig. 2 Sketch map of multi-beam detection at different frequencies

(a)  $f = 50 \text{ kHz}, \theta = 71^\circ$  (b)  $f = 200 \text{ kHz}, \theta = 16.8^\circ$ 

$71^\circ$ ,由 B1、B2、B3 等依次表示各波束,每两个相邻波束间存在重叠的探测区域,如  $B1 \cap B2$ 、 $B2 \cap B3$  等 8 个灰色区域。此时,多波束探测实际上可将网箱内部空间在水平方向上分割为 16 个区域,通过相邻波束探测回波的空间相关方法,提取每个分割区域内的鱼群分布情况、网衣状态等。由于低频宽波束探测覆盖面大,可完整覆盖全网箱空间,所以这种探测模式适用于静态分布或低速游动鱼群。低频探测中,1 次网箱扫描每个波束只需探测 1 次,完成时间短(不到 1 s),回波数据量小,有利于鱼群状态和网箱安全分析,但成像困难。

图 2b 表示换能器工作在 200 kHz 时,多波束实施网箱探测的示意图。该频率下,声束宽度仅有  $16.8^\circ$ ,8 个波束累加不能覆盖全网箱,只能在网箱内部形成 8 道均匀分布的检测带,如图中 8 个灰色区域。高频窄波束探测时,每八分之一网箱空间内的鱼群跨越该区域检测带后即完成全网箱扫描,这种探测适用于快速游动的鱼群(大于  $1 \text{ m/s}$ )。与低频探测相比,高频探测在一次网箱扫描中每波束需经历若干次探测,数据量大,有利于鱼群量估计和成像。

选择何种工作频率实施探测,关键在于确定鱼群游速。经过对网箱养殖真鲷连续长时间观测发现:鱼群游动具有结群性,环绕着网衣壁活动;游动速度有一定规律性,如清晨喂食、傍晚时游速快,中午、夜间游动缓慢或静止。目前,缺乏有效的网箱鱼群游速测量方法,只能根据经验来推断鱼群的大致速度。

## 2.2 环形多波束网箱探测

基于环形多波束换能器的深水网箱探测依赖于有一套完整的信号发射和回波处理装置<sup>[9]</sup>。环形多波束网箱探测的流程图如图 3 所示。节点控制器选择工作频率后,控制双频发射器发射对应频率的脉冲探测信号;再由节点控制器依次选择继电器电路

8 路开关的通、断,确定当前发射波束;探测波束的回波信号经过限幅、前置放大、混频、中频滤波、程控放大、检波等处理后接入到节点控制器的采样平台上实现模数转换。环形多波束网箱探测中重要参数有:相邻波束探测的时间间隔  $t$ ,由波束探测半径  $R$  决定, $R$  要略大于网箱半径  $r$ ,即

$$t \geq 2R/c \quad (1)$$

式中  $c$ ——声速,  $\text{m/s}$

高频探测时,每次网箱扫描过程中一个波束探测次数  $n$  则由鱼群游过八分之一网箱周长的时间  $T$  决定,即

$$T = 2\pi r / (8v) \quad (2)$$

$$n = T / (8t) \quad (3)$$

式中  $v$ ——鱼群游速,  $\text{m/s}$

目前,福建海域深水域养殖以周长为 40 m 的 HDPE 圆形浮式网箱为主,当  $R = 9 \text{ m}$ 、 $c = 1500 \text{ m/s}$ 、 $v = 1 \text{ m/s}$  时,  $t \geq 12 \text{ ms}$ ,  $T = 5 \text{ s}$ 。本系统中,需要考虑继电器通道切换耗时,取  $t = 20 \text{ ms}$ ,则  $n \approx 32$ 。

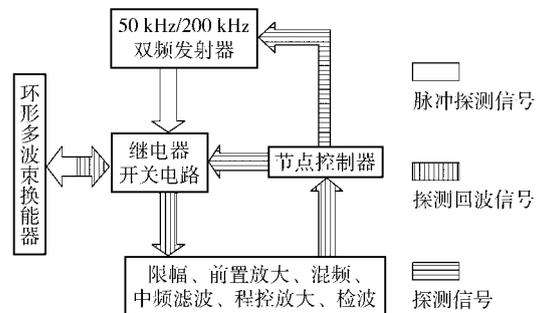


图3 环形多波束探测流程图

Fig. 3 Flow chart of circular multi-beam detection

## 2.3 节点控制器

节点控制器主要由 MCU - 51 单片机 (AT89S52)、模数转换器 (ADC0820BCN) 和电子开关 (CD4051BCN) 构成,是节点的逻辑控制中心。节点控制器经单片机上的通用异步接收/发送装置 (UART) 连接 GPRS DTU,通过 DTU 远程接收用户指令,识别指令类型后作出对应的控制操作,同时将采集的各种探头数据再通过 DTU 实时传回本地监控中心。节点控制器提供了一个最大可扩展至 8 路的模拟信号采样平台,用户可根据需要即时接入标准化探头,在每一次网箱扫描周期内会将搭载在平台上的各种探头信号转换为数字信号,转发回本地监控中心。采样平台针对不同信号采用不同的采样率,环形多波束探测的回波包络信号采样率设置为  $10 \text{ kS/s}$ 。

## 2.4 GPRS 数据传输单元

基于移动通信基站子系统的 GPRS 技术提供了一种高效、低成本的无线分组数据业务,具有实时在

线、接入速度快、传输速率高等优点，广泛应用于覆盖 GPRS 信号区域的无线数据传输中。本系统采用的 GPRS DTU 型号是 CM3150EP，具有电话、短信、预设数据指令等多种激活方式。每个远程探测节点连接一个 DTU，节点身份可通过插入 DTU 的移动 SIM 卡卡号进行识别。已接入系统的远程探测节点在本地监控中心上均可显示代表身份的 SIM 卡卡号，用户可以随时随地通过手机短信、电话或通过本地监控中心发送预设数据激活指定 DTU，向对应的远程探测节点发送操作指令，查看该网箱内鱼群活动状态、准确位置、水质变化情况等信息。DTU 的数据传输速率由 UART 口的波特率设置，UART 口的波特率是 115.2 kb/s，略大于探测回波包络信号采样率，保证对网箱鱼群状态探测的实时监测。

### 3 本地监控中心

本地监控中心借助美国国家仪器公司实验室虚拟仪器集成环境平台 (LabVIEW) 开发，架构于可接入互联网的计算机上，实现用户指令发送，探测数据接收、处理和存储，网箱扫描图像合成，鱼群量估计，风险判定，异常情况报警等功能。本地监控中心的结构框图如图 4 所示。用户可通过本地监控中心的指令选择器或随时随地通过手机电话、短信发送网箱探测指令，指令经数据服务中心发布到互联网上，由指定 SIM 卡卡号的 DTU 接收；连接该 DTU 的远程探测节点作相应网箱探测，探测数据调制后通过互联网被传送至指定 IP 地址的本地监控中心，由数据服务中心接收、解调；解调数据要进入数据处理中心完成各种探头数据分类、相应数字信号处理，将环形多波束探测鱼群回波数据合成图像、通过数据估计鱼群量大小；最后，综合合成图像、鱼群量估计结果和其他探测得到的养殖参数进行养殖风险判定和风险报警，并将该次网箱探测结果通过 DTU 以短信形式发送给用户。

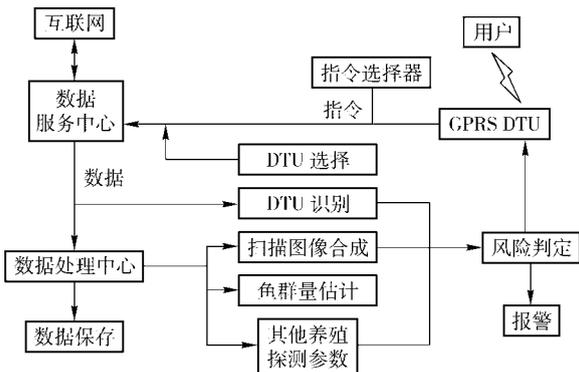


图 4 本地监控中心结构框图

Fig. 4 Structure of local monitor and control center

### 4 海上试验结果及分析

监测系统在福建省泉州市围头港深水网箱养殖场进行了水下现场试验。现场网箱均为周长 40 m、高度 6 m 的 HDPE 圆柱形深水网箱，布设在离岸大约 1 km、水深 10 m 左右、覆盖了 GPRS 信号的海域。网箱养殖鱼类为真鲷，鱼体长度在 25 ~ 30 cm 之间。系统在 3 口不同鱼量网箱上布置了远程探测节点，并开展了大量试验：一号网箱为空网箱，二号网箱放养 1 000 条真鲷，三号网箱放养 1 600 条真鲷。

图 5 是 6 次 200 kHz 高频探测 3 口网箱的多波束合成扫描图<sup>[9]</sup>。探测鱼群均处于快速游动状态，参数设置如 2.2 节中介绍。波束探测半径为 9 m，覆盖整个网箱及网箱外 3 m 空间，一次网箱扫描中每个波束探测 32 次，耗时约 5 s。探测回波强度采用不同颜色表示。扫描图中心点周围半径 0.8 ~ 1.0 m 的圆面区域是环形多波束换能器的探测盲区。距离探测中心约 6 m 的圆环轮廓代表了网箱网衣，从图中可以看出：空网箱网衣轮廓圆环形状不规则，这是因为在试验中空网箱网衣底部未悬挂重物，随波浪、潮流飘移大，而有鱼网箱为保证养殖空间在网衣底部都悬挂有沙袋；有鱼网箱网衣轮廓闭合性差，这是鱼群遮蔽波束探测造成的。分布在网衣内环的回波代表养殖鱼群，外围回波表示网箱养殖饵料吸引的鱼群或从网箱逃逸的鱼群。外围回波是否表示逃逸鱼群需要通过养殖风险判定机制综合考虑多种因素作出判断：若不存在鱼群逃逸风险，合成扫描图再经图像净化处理去除杂波，如图中下行 3 幅图所示；若存在风险，则发出警报。通过扫描图，用户可观察当前鱼群在网箱中的大体分布情况；横向比较扫描图，虽难以定量确定鱼群量，但能够直观判断各网箱中鱼群量大小，而准确估计鱼群量则要依赖于相关的鱼群量估计算法。

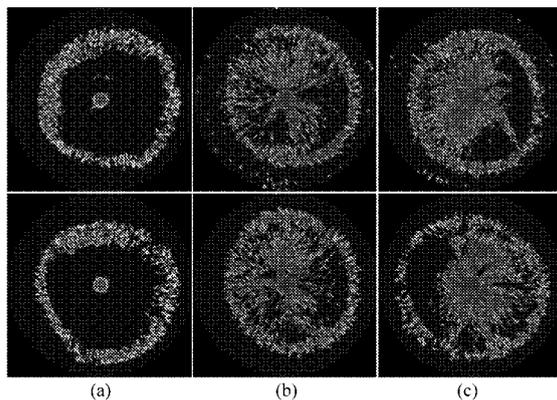


图 5 多波束网箱探测合成图

Fig. 5 Scanning map of cage by multi-beam

(a) 一号空网箱 (b) 二号少鱼网箱 (c) 三号多鱼网箱

网箱鱼群量估计是鱼类声学研究中的难点,受多方面因素影响:养殖区风浪、潮流等海洋要素的繁杂多变;喂食、行船等干扰;换能器混响盲区和强海面海底反射;鱼群密集时鱼体遮蔽波束探测;部分鱼群贴壁游动,使鱼群回波和网衣回波叠加,难以区分;游动鱼群引起的重复探测等。所以,目前针对网箱的鱼群量估计算法及估计精度方面的报道较少。

本系统研究中曾针对性地提出深水网箱鱼群声学反向散射积分模型,推导且通过实测验了高频、窄波束探测回波更有利于准确估计鱼群量的结论,并通过简化模型,修正了回波能量积分法,应用于深水网箱鱼群量声学评估中<sup>[9]</sup>。根据模型应用条件,提取海上试验中全部116次高频探测回波进行鱼群量估计,其中对三号多鱼网箱共探测48次,对二号少鱼网箱共探测68次,网箱鱼群量与实际养殖鱼群量相比较的偏差量如图6所示。从图中可以看出,网箱鱼群量估计离散区间较大,有的高达30%,只由一次网箱鱼量估计值难以准确确定当前网箱鱼群量,但若采用连续多次网箱鱼量估计值(通常在20次以上)的平均值则可以准确估计鱼群量,估计偏差可降低至3%。本系统风险判定机制中若将鱼量估计偏差门限绝对值设定为25%,在保证养殖安全前

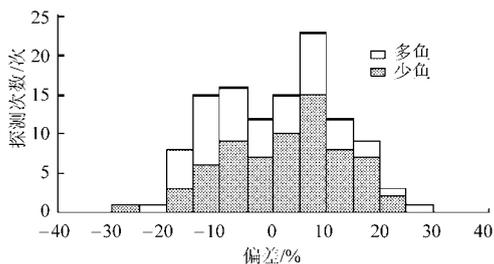


图6 鱼群量估计的偏差直方图

Fig. 6 Frequency histogram of deviation of fish amount estimation

提下可尽量减少虚警概率。

## 5 结论

(1) 通过深水网箱养殖现场测试,表明该系统具有海上操作灵巧、易于安置、性能稳定的特性;集中式结构有利于系统扩展、维护,也方便用户对现场网箱群的监测和管理;采用环形多波束探测实现快速网箱扫描,将网箱扫描时间由传统机械扫描的分钟数量级减少到几秒,大大提高了鱼群状态显示的实时性,也提高了网箱鱼群量估计精度;采用GPRS无线数据传输技术,为用户提供了一种远程、实时、全天候、不受地点限制的监控方式。

(2) 采用环形多波束分区扫描探测方式对鱼群游速的估计具有较高要求,游速的低估或高估会造成部分鱼群漏探测或重复探测。目前系统采用根据经验推断的游速(如清晨鱼速较快、中午较慢)存在较大偏差,下一步可以引入多普勒频移或生物跟踪技术测量鱼群速度。

(3) 改进多波束换能器的制造工艺。目前的换能器在发射高频信号时,垂直方向波束角太小,不能完成覆盖整个网箱,只能采取分层扫描的方式。

(4) 网箱养殖海区一般具有良好的太阳能和风能发电条件,可以改进系统电池供电方式,使系统具有更强的持续工作能力。

(5) 系统仅停留在报警阶段,在事故发生后缺乏行之有效的应对措施,特别是发生鱼群逃逸时,不能有效减少损失。在开展网箱养殖鱼群发声和声响试验时发现:当鱼群喂食时采用特定声信号进行刺激,会使鱼群建立对该声信号的条件反射,所以,设想在鱼群逃逸时,通过播放该信号引诱鱼群,为用户争取时间。

## 参 考 文 献

- 1 FAO. State of the world's fisheries and aquaculture[R]. Rome:FAO, 2010.
- 2 吴常文, 常抗美. 深水网箱养殖——现代耕海牧渔的发展方向[J]. 中国渔业经济, 2006(1): 67~69.  
Wu Changwen, Chang Kangmei. Offshore aquaculture cage—the development direction of modern fisheries[J]. Chinese Fisheries Economics, 2006(1): 67~69. (in Chinese)
- 3 湛志新, 江涛, 王书晶. 国内抗风浪网箱研究存在的问题及发展方向[J]. 渔业现代化, 2006, 33(3): 27~28.
- 4 关长涛, 崔国平, 李娇, 等. 多视角深水网箱水下监视器的研制[J]. 渔业现代化, 2008, 35(1): 10~14.  
Guan Changtao, Cui Guoping, Li Jiao, et al. The design and development of multi-angle view underwater monitor used for deep-sea cage culture[J]. Fishery Modernization, 2008, 35(1): 10~14. (in Chinese)
- 5 张小康, 许肖梅. 基于水声多波束技术的深水网箱鱼群状态远程监测仪研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1656~1661.  
Zhang Xiaokang, Xu Xiaomei. Remote monitor system for offshore fish cage based on underwater acoustic multi-beam technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8): 1656~1661. (in Chinese)

机的软件设计,实现了精度在 $0.2^{\circ}\text{C}$ 的温度检测( $10\sim 70^{\circ}\text{C}$ )。同时运用自适应加热速度控制、带死区的温度控制和PID控制等方法,实现了对加热速度和保温温度的精确控制,为准确分析害虫的耐热性提供了试验仪器。

## 参 考 文 献

- 1 李文婷,刘健民. 绿色壁垒与我国农产品出口贸易对策[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2010,16(3):34~36.  
Li Wenting,Liu Jianmin. Outermeasures for green barrier and export trade of China's agricultural products[J]. Journal of Hunan Environment-biological Polytechnic, 2010,16(3):34~36. (in Chinese)
- 2 赵琪. 技术性贸易壁垒对我国农产品出口影响的实证分析[J]. 安徽农业科学, 2011,39(14):8744~8746.  
Zhao Qi. Empirical analysis on the impacts on Chinese agro-products export caused by technical barrier to trade [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011,39(14):8744~8746. (in Chinese)
- 3 李景奎,戚大伟. 物理灭虫方法及机理研究[J]. 林业劳动安全, 2006,19(2):20~23.  
Li Jingkui,Qi Dawei. Physical control methods against insects and study on their mechanism[J]. Forestry Labour Safety, 2006,19(2):20~23. (in Chinese)
- 4 马玉花,赵忠,江志利,等. 苦杏仁精油的熏蒸杀虫活性研究[J]. 西北植物学报, 2007,27(9):1879~1883.  
Ma Yuhua,Zhao Zhong,Jiang Zhili,et al. The fumigating activity of bitter almond oil for insects[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007,27(9):1879~1883. (in Chinese)
- 5 Negahban M,Moharramipour S,Sefidkon F. Fumigant toxicity of essential oil from *Artemisia sieberi* besser against three stored-product insects [J]. Journal of Stored Products Research, 2007,43(2):123~128.
- 6 Sfara V,Zerba E N,Alzogaray R A. Fumigant insecticidal activity and repellent effect of five essential oils and seven monoterpenes on first-instar nymphs of *Rhodnius prolixus*[J]. Journal of Medical Entomology, 2009,46(3):511~515.
- 7 Ikediala J N,Tang J,Wig T. A heating block system for studying thermal death kinetics of insect pests[J]. Transactions of the ASAE, 2000,43(2):351~358.
- 8 Wang S,Tang J,Johnson J A, et al. Thermal-death kinetics of fifth-instar *Amyelois transitella* (Walker) (*Lepidoptera: Pyralidae*) [J]. Journal of Stored Products Research, 2002,38(5):427~440.
- 9 Wang S, Yin X, Tang J, et al. Thermal resistance of different life stages of codling moth (*Lepidoptera: Tortricidae*) [J]. Journal of Stored Products Research, 2004,40(5):565~574.
- 10 赵捷,孙桂玲,谷兆麟. 高精度热疗灌注机温度测量系统的设计与实现[J]. 南开大学学报:自然科学版, 2007,40(5):72~75.  
Zhao Jie,Sun Guiling,Gu Zhaolin. Design and realization of high precision temperature measurement system of heat treatment filler[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2007,40(5):72~75. (in Chinese)
- 11 席平原,朱江,申屠留芳. 带式输送机闭环特性动态分析与PID控制[J]. 农业机械学报,2010,41(12):210~214.  
Xi Pingyuan, Zhu Jiang, Shentu Liufang. Analysis and PID control on dynamical performance of conveyor possessing closed-loop[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12):210~214. (in Chinese)

(上接第182页)

- 6 汤涛林,李娇,倪汉华,等. 多波束深水网箱声学监测仪的研究[J]. 海洋渔业, 2009,31(3):330~334.  
Tang Taolin, Li Jiao, Ni Hanhua, et al. Study on multi-beam acoustic monitor for deep water cages[J]. Marine Fisheries, 2009,31(3):330~334. (in Chinese)
- 7 Michel A P M, Croff K L, McLetchie K W, et al. A remote monitoring system for open ocean aquaculture [C]//Oceans 2002 MTS/IEEE, 2002(4):2488~2496.
- 8 Chris Rillahan, Michael Chambers, Howell W H, et al. A self-contained system for observing and quantifying the behavior of Atlantic cod, *Gadus morhua*, in an offshore aquaculture cage[J]. Aquaculture, 2009,293(1~2):49~56.
- 9 张小康. 深水网箱中鱼类声学散射特性和鱼群状态监测仪研究[D]. 厦门:厦门大学,2010.  
Zhang Xiaokang. Study on acoustic scattering characteristics of fish and monitor system for bred fish in offshore fish cage[D]. Xiamen: Xiamen University, 2010. (in Chinese)