

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*

张小康, 许肖梅

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门大学海洋与环境学院 厦门 361005)

摘要: 针对离岸深水网箱养殖的鱼群安全问题, 提出了一种基于水声多波束技术的鱼群状态监测新方法。该方法采用环形水声多波束阵在深水网箱中进行分区探测, 结合多路声信号处理技术、数据无线传输技术和虚拟仪器技术, 实现了深水网箱中鱼群状态的远程、实时监测。与传统电机旋转扫描方法比较, 该方法结构简单、功耗小, 探测速度快, 完成一次全网箱探测只需4 s; 采用回波能量积分算法估计鱼群量, 偏差值小于25%。监测仪样机在海上易于安置、操作方便; 在福建泉州围头海域深水网箱养殖现场不同的海况条件测试中性能稳定、可靠。

关键词: 深水网箱; 远程监测; 水声多波束; 鱼量估计

中图分类号: TP733.23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.60

Remote monitoring system for offshore fish cage based on underwater acoustic multi-beam technique

Zhang Xiaokang, Xu Xiaomei

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

Abstract: Aiming at the safe problem of fish shoal in offshore fish cage, a monitoring method based on underwater acoustic multi-beam technique is introduced. The method employs an annular multi-beam array to detect the fish cage in division cage scanning mode, which integrates with the techniques of multi-path signal processing, wireless data communication and virtual instrument, and can implement the remote real-time monitoring of the offshore fish cage. Compared with traditional method of motor rotating cage scanning mode, the method simplifies the system structure, diminishes power dissipation and accelerates scanning speed. It takes only 4s to accomplish an entire cage scanning. By using the algorithm of energy integral, the deviation of the fish amount estimation is less than 25%. The prototype is easy to install and operate. Test results in the pool and in the field of Weitou harbor, Quanzhou of Fujian show that the system has good performance under different environment conditions.

Key words: offshore fish cage; remote monitoring; underwater acoustic multi-beam; fish amount estimation

1 引言

深水网箱因具有抗风浪能力强、养殖高产高效、环保等优点而得到广泛的推广应用, 目前已成为我国渔业养殖的重要组成部分^[1]。但是, 较传统网箱养殖, 深水网箱所处水域深、离岸距离远、鱼群活动范围大, 造成了网箱鱼

群安全日常监测麻烦, 异常情况(如网衣破裂、鱼群逃逸等)反馈严重滞后等问题, 急需开发高效的深水网箱鱼群安全监测配套设施^[2]。

美国麻省理工大学和 Woods Hole 海洋研究所于2002年研制出了光声结合的电机旋转扫描方式的远程网箱监测系统^[3], 能够分辨出鱼个体, 实现网衣安全监测; 但其成本高、电机旋转探测所需的声学成像时间长, 标准成像

收稿日期: 2009-03 Received Date: 2009-03

*基金项目: 国家自然科学基金(40776022)、福建省科技重点项目(2006N0042)资助

时间为 3 min,对网箱内游动鱼群会产生大量的重复探测,导致鱼群量估计的较大误差。中国水产科学研究院渔业机械研究所采用光学手段研制了多视角网箱监测器^[4]。但在我国除了海南海水较为清澈外,大部分的沿海地区海水浑浊,使用光学方法进行水下目标有效观测的距离短,耗电量大,所以国内研究大部分集中在声学监测方法上:中科院东海站提出了声学警戒带方法、水下机器人巡视法;厦门大学先后开发了基于竖直探测法以及单波束换能器电机旋转水平扫描法的声学监测系统^[5-6]。

本文介绍一种海上操作方便,易于安置,抗风浪能力强的基于水声多波束技术的深水网箱鱼群状态远程监测仪。该仪器利用安置在网箱中心水面下一定深度的环形多波束换能器阵,对网箱内部进行快速的水平及一定垂直角度的分区探测,对鱼群量大小进行估计,并通过远程无线传输技术将探测的回波信号传回岸站,当发现异常情况时,发出报警信号。实现了对深水网箱内鱼群分布和活动状态、网衣安全等情况的远程、实时监测。系统还可提供友好的人机界面,供使用人员进行系统工作模式、参数设定及状态显示方式的选择。使用该系统可使养殖户在养殖过程中对水下鱼群活动状态能及时了解,减少深水网箱养殖风险,有效避免由于网箱网衣破损、鱼群逃逸而造成的巨大经济损失。

2 系统结构

监测仪由布设在海上网箱养殖现场的声探测系统、岸站上的用户监测系统和连接二者的无线数据传输系统 3 部分组成,监测仪原理框图如图 1 所示。声探测系统完成网箱鱼群的声学探测,探测回波的放大、滤波、检波等信号预处理,

以及回波的模数转换和数据保存等工作;无线数据传输系统利用一对串口无线通信模块,建立网箱养殖现场和岸站的远程通信,传送用户监测系统发出的操作指令和将声探测系统采集到的数据回传岸站;用户监测系统把接收到的探测数据,作相关的数字信号处理(如时间增益控制、相关处理等),抑制混响和消除噪声后,在仿真网箱的雷达图上实时显示,并通过能量积分法估计网箱内鱼群量大小。

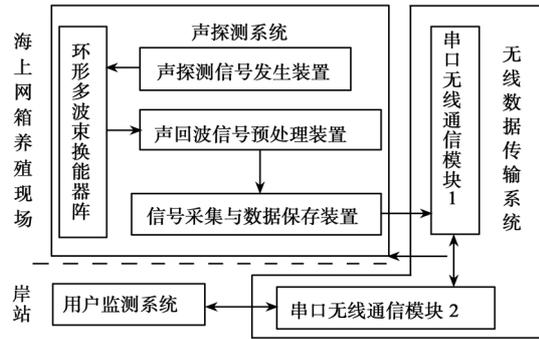


图 1 监测仪原理框图

Fig.1 Functional block diagram of the monitoring system

2.1 声探测系统

声探测系统安装在海面浮标上,采用 24 V 电池供电,由岸站用户远程控制,具有连续和间歇 2 种工作模式:连续工作模式对网箱进行全天候探测,让用户随时掌握鱼群信息;间歇工作模式只在用户需要的情况下探测网箱,功耗小,使系统持续工作时间加长。系统最大探测半径 50 m,可根据实际探测环境需要调节。系统结构如图 2 所示,主要由声探测信号发生装置、环形多波束换能器阵、声回波信号预处理装置和信号采集与数据保存装置 4 部分组成。

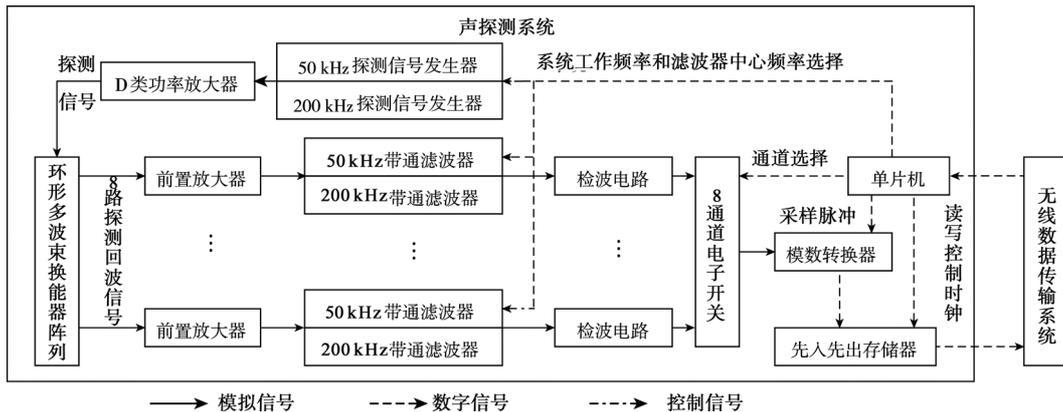


图 2 声探测系统结构图

Fig.2 Functional block diagram of the acoustic detecting system

2.1.1 声探测信号发生装置

声探测采用周期的高频窄脉冲信号,信号参数设计依赖于海洋环境噪声分布(决定载波频率)、所探测网箱内的鱼体平均尺寸(决定脉冲宽度)和系统整体处理速度(决

定重复周期)等因素。本仪器探测信号的载波为 50 kHz/200 kHz 双频可选。监测装置在接收到用户发送的启动命令后,发射探测信号,通过 D 类推挽功率放大器进行功率放大后,通过开关依次选择环形多波束换能器阵中的阵元

发送,直至该次网箱探测结束后,停止探测信号发射。

2.1.2 环形多波束换能器阵

采用固定环形多波束换能器阵列的水平分区探测方式,无需转动换能器就可以探测到整个网箱内部鱼群的分布情况。环形多波束换能器阵由若干个水平探测角以及垂直探测角都相同的同一型号的单波束换能器以环形结构排列而成,每个换能器阵元都只负责对网箱内某一特定区域的探测。阵列中阵元数目越多,每个阵元的探测区域划分就越精细,空间分辨越高。这种固定阵列探测方式,相较于单波束换能器旋转扫描方式,不仅能减少由于全方向扫描所需要的电机等机械部件,节省供电,使海上现场的操作简单方便,而且还可以提高探测速率,减少游动鱼群的重复探测,大大提高网箱内鱼群量的估计精度。本仪器采用了8个阵元的环形换能器阵,设计每个换能器都具有50 kHz/200 kHz 双频发射功能,低频时,探测角大,可用于网箱粗探;高频时,探测角小,完成网箱细探。图3所示为阵列中某换能器阵元在 $f=50$ kHz时的指向性。目前,福建主要养殖海域内深水网箱的结构均为直径12 m、高6 m的圆柱体,针对这样情况,将换能器阵安置于网箱中心水面下2~3 m处,就可以使阵列的探测区域基本上覆盖了深水网箱内鱼群活动空间。

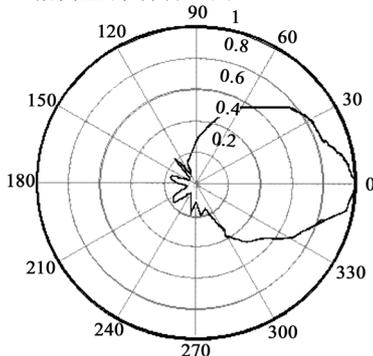


图3 某一阵元在 $f=50$ kHz时的指向性

Fig.3 Directional diagram of a transducer at $f=50$ kHz

2.1.3 声回波信号预处理

声回波信号预处理含有8路信号预处理电路,每路预处理电路都包括前置放大器、带通滤波器和检波电路,对应处理换能器阵中8个阵元接收的回波信号。

前置放大器采用Lattice公司的在系统可编程模拟器件ispPAC10,由4个PAC块可以通过级联构成多级放大电路,实现最大带宽为550 kHz的-80~80 dB之间的可变增益。带通滤波器采用MAXIM公司的MAX275单片集成有源滤波芯片,它含有2个二阶可变滤波器单元(二阶节),不需要外接电容,只需外接电阻,就可以实现中心频率最高达300 kHz的四阶带通滤波器。由于该仪器具有50 kHz/200 kHz双频可选工作模式,所以在信号预处

理装置中要设计中心频率分别为50 kHz和200 kHz的2套窄带带通滤波器,通过发送用户命令选择。

2.1.4 信号采集与数据保存装置

信号采集与数据保存装置由单片机(AT89S52)、模数转换器(ADC0820BCN)和先入先出(first in and first out, FIFO)模式的存储器(IDT7208)构成。单片机通过控制电子开关的通断把声回波信号预处理装置的8路输出信号依次连接到模数转换器上完成转换;转换所得数据在附加了通道标识后暂存在存储器中(该步用于克服数据采集速率大于发送速率而造成的数据丢失问题),同时,无线数据传输系统依次将保存的数据发送回岸站用户监测系统。该装置与岸站的用户监测系统之间的通信协议具有错误重发机制,当在数据发送过程中发生错误时,存储器中的数据会重新发送,直到实现正确发送为止。

2.2 无线数据传输系统

无线数据传输系统由上海桑锐电子科技有限公司的1对SRWF-501-50型串口无线通信模块构成。该模块采用FSK调制方式;选用的载波频率为420~450.3 MHz(分为8个频段,用户可以根据现场环境噪声的分布特点,选用一个干扰偏弱的信道,降低传送误码率);集合UART TTL/RS232/RS485三种接口类型,满足不同情况的需要,接口速率为9 600 bps;发射功率为50 mW,开放空间下的可靠传输距离为1 200 m。在海上网箱养殖现场,模块1通过UART TTL接口连接声探测系统中单片机的UART口,接收工作频率选择、探测启动等操作命令和发送采样数据;在岸站,模块2采用RS232接口连接用户监测系统中PC的RS232串口,发送操作命令和接收采样数据。

2.3 用户监测系统

用户监测系统的开发基于美国国家仪器公司的实验室虚拟仪器集成环境(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, LabVIEW),完成探测数据的接收、存储和各种相关数据、图像处理,具备鱼群量估计,异常情况报警等功能,并且向用户提供了友好的人机界面,方便仪器操作和显示探测结果。

系统工作流程如图4所示:首先通过PC上的RS232串口向声探测系统发送相关操作命令,接收到应答信号后,进入数据接收状态,接收由无线数据传输系统回传的网箱探测数据,并将其直接写入磁盘存储空间;其次,依次读取保存在磁盘空间的每组探测数据,完成如时间增益控制、相关、幅度判决等信号处理,抑制混响、消除噪声,提取目标回波;再次,根据每组数据附加的通道号、接收延迟等空间和时间信息确定该组数据在平面极坐标系中的位置,对应显示在仿真网箱形状的雷达图中;最后,对当次网箱探测的数据进行能量积分,估计网箱内鱼量的大

小,并将显示的雷达图像和估计的鱼量值通过人机界面传递给用户,当发现有异常情况时,向用户报警。

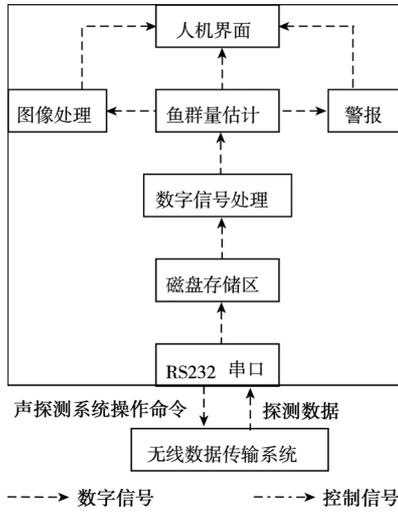


图 4 用户监测系统工作流程

Fig.4 Functional block diagram of the user monitoring system

用户监测系统成像原理：以雷达图模拟网箱环境（如图 5 用户监测系统人机界面的右上角所示）；根据环形多波束换能器中阵元个数将雷达图极坐标系均分为 8 个显示扇区，每个扇区显示对应阵元的探测回波，扇区越小，探测的空间分辨率越大；在鱼群游动情况下，为了能够反映出某个扇区内鱼群的变化情况，每个扇区要显示一个阵元的若干次探测回波。每组探测回波数据根据附加的通道标识号判定所属扇区，再根据延迟时间判定在该扇区中的具体位置：不同扇区的回波反映网箱鱼群的空间分布信息，同时，也能反映该扇区对应网箱位置的网衣安全情况；而同一扇区内不同位置回波则反映了在某个探测时刻，网箱鱼群在该扇区的分布情况，通过变化着的回波就可以分析鱼群的游动状态。雷达图以不同颜色代表不同的回波强度，红、黄、绿、蓝表示强度由强到弱的变化过程，蓝色代表无探测目标回波，蓝色圆面表示仪器设置的探测范围，圆心表示换能器阵所在位置。所以，从探测图上用户可以容易地判定网衣安全、鱼群空间分布以及运动状态等信息。

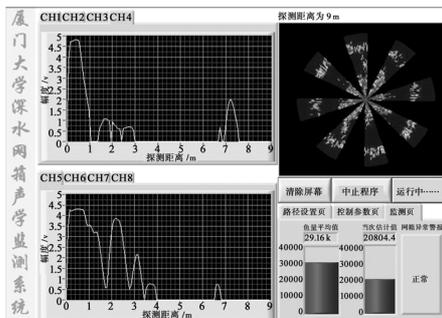


图 5 用户监测系统的人机界面

Fig.5 Human-machine interface of the user monitoring system

3 海上实验结果及性能分析

监测仪在实验室水池以及福建泉州围头港深水网箱养殖场进行了水下试验。实验室水池为长约 4.8 m、宽约 3 m、水深约 2 m 的长方体。现场网箱为直径 12 m、高度 6 m 的圆柱体，布设在离岸大约千米、水深 10 m 左右的海域，海域网箱养殖以真鲷为主，鱼体平均长度在 25~30 cm 之间，监测仪对养殖现场内 3 口不同鱼量的网箱（无鱼、少鱼（1 000 条左右）和多鱼（1 600 条左右））进行了大量的实验。如图 6 所示，(a) 为深水网箱养殖现场实验中用于安装声探测系统的浮标、(b) 为监测仪使用的环形多波束换能器阵列。

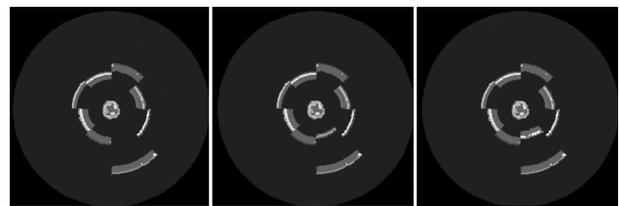


(a) 监测仪浮标 (b) 环形多波束换能器阵

图 6 监测仪海上装置图

Fig.6 Facilities of the monitoring system used in the sea

图 7 所示为监测仪在水池中对不同类型的静止目标的探测示意图，监测仪的探测半径设定为 4.5 m，(a) 为空水池的探测示意图，由于环形多波束换能器阵中含有 8 个探测波束，静止地探测 8 个方向的矩形水池壁，所以产生了 8 段不连续的回波；阵元探测池壁信号的入射角越小，回波越强，反之越弱，使得 8 段探测回波的厚薄、颜色存在差异；(b) 是在换能器阵的右下方波束前方 1.2 m 处放置一段深水网箱的网衣所得的探测图，网衣孔径大约 25 mm，编织网衣的尼绒线直径约 10 mm；(c) 是在相同的位置上放置一段直径约 30 mm 的钢管所得的探测图。比较 (b)、(c) 图，可以看到在相同条件下，钢管的回波强度要远大于网衣的回波强度。



(a)空水池 (b)水池中放置一段网衣 (c)水池中放置一段钢管

图 7 实验室水池目标探测示意图

Fig.7 Detecting maps of different targets in the pool of Lab

图 8 所示为监测仪在深水网箱养殖现场分别对三口不同鱼量网箱的探测示意图，(a) 是多鱼网箱探测图，(b)

是少鱼网箱探测图, (c) 是空网箱探测图。监测仪设置的探测半径设为 9 m, 覆盖了整个网箱空间以及网箱外 3 m 空间, 在距离探测中心约 6 m 的圆环轮廓代表了网箱的网衣; 探测中心外 0.8~1 m 的红色区域是监测仪的探测盲区; 分布在盲区与网衣之间的回波则代表网箱鱼群, 通过比较各探测图, 可以定性判断各网箱中鱼量大小, 还可以观察到当前鱼群在网箱中的大体分布, 结合鱼群的生活习性, 用户可以获取更多相关的养殖信息, 及时准确地做出工作部署, 提高效率。

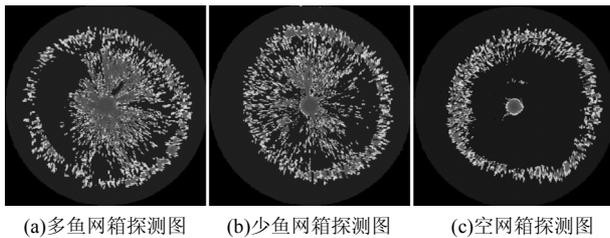


图 8 网箱探测示意图

Fig.8 Detecting maps of three offshore net cages

深水网箱的探测回波受到多方面因素的影响: 1) 海洋环境复杂多变造成网箱探测回波变化大, 如风浪、潮流等因素引起的网箱起浮、网衣漂移使得探测到的网衣回波各不相同, 图 8 (c) 中所示, 网衣正是由于潮流的影响发生漂移致使网衣回波呈现不规则的形状; 2) 在鱼群密集网箱内, 鱼群的遮挡也会影响探测回波, 如图 8 中(a)和(b)所示, 由于密集鱼群造成了网衣回波的不连续; 3) 鱼群状态尤其是游动鱼群引起的重复探测是网箱探测中最主要的影响; 4) 此外, 换能器混响、海面海底反射、鱼群位置等因素也能对探测回波产生很大影响。由此可见, 深水网箱鱼群探测以及对网箱内鱼群量的准确估计具有很大难度。本监测仪结构上的改进可以为用户提供 2 种安全判定方法:

从探测图上观察网衣回波是判定深水网箱中鱼群安全的一种方法。当网衣回波不连续且在回波不连续处的网箱外出现回波信号就表示网箱可能破损、鱼群正在逃逸。图 8 (a)、(b) 中, 深水网箱的网衣由于鱼群遮挡、风浪、潮流等因素的影响, 探测回波呈现出规则、不连续的状态, 但是, 在缺口处没有回波信号, 表示网箱内鱼群安全。

估计网箱内鱼量, 通过查看鱼量变化是判定网箱内鱼群安全的另一方法。鱼群量估计的准确度受鱼群游动、波浪、潮流等因素的影响很大, 特别是游动鱼群引起得重复探测问题, 会使监测仪对同一口网箱地探测结果存在较大偏差, 所以, 只有缩短探测时间, 才能提高探测精度。现有的单波束机械转动扫描探测方式所需的时间较长, 一般在分钟数量级上, 进行鱼量估计误差太大, 没有现实意义,

而该监测仪由于提出了新的网箱探测方法, 将时间缩短到 4 s 左右, 大大地提高了网箱探测速度, 也使鱼量估计达到一定的精度。我们曾提出 3 种不同的深水网箱鱼量估计算法^[7], 并进行了比较, 发现针对检波后的信号, 采用回波能量积分法能更为准确地反映出网箱内的鱼群量。表 1 所列数据是对 3 口不同鱼量网箱分别作 30 余次的实验, 并采用能量积分法计算回波取得的: 鱼量估计的总平均值 (\bar{E} , 即 30 次鱼量估计值的统计平均值)、最接近总平均值的单次估计值 (E_{\min}) 和最大偏离总平均值的单次估计值 (E_{\max}) 以及它们相对于总平均值的偏差百分比 (P)。式 (1) 中 R' 表示多鱼网箱和少鱼网箱总平均值的比值, 式 (2) 中 R 表示这两口网箱中实际鱼量大小 (只考虑鱼条数 N , 不考虑个体差异) 的比值, 比较 R' 和 R , 可以看到, 两者几乎相等, 这表明能量积分法的统计平均值是能够比较准确的反映出每口网箱鱼量大小的。

通过分析最大偏差百分比可以获得一个参考值, 系统可以设定这个参考值为偏差百分比门限值, 若单次估计的鱼量值与总平均值比较, 偏差百分比大于该门限值, 监测仪会向用户发出警报 (该监测仪门限值设为 25%, 这样可以最大限度地减少虚警概率)。

表 1 对 3 口不同鱼量网箱的鱼量估计结果分析

Table 1 Statistic of fish amount estimation of three offshore net cages

	E_{\min}/V^2	$P(\%)$	E_{\max}/V^2	$P(\%)$	\bar{E}/N^2
空网箱	4 213	0.8	3 376	20.5	4 247
少鱼网箱	25 169	2.5	20 005	22.5	25 814
多鱼网箱	36 608	3.7	28 549	24.9	38 015

$$R' = \frac{\bar{E}_2(\text{多鱼网箱})}{\bar{E}_1(\text{少鱼网箱})} = \frac{38\,015 - 4\,247}{25\,814 - 4\,247} = 1.57 \quad (1)$$

$$R = \frac{N_2(\text{多鱼网箱})}{N_1(\text{少鱼网箱})} = \frac{1600}{1000} = 1.60 \quad (2)$$

除了上述的监测性能分析外, 由于监测仪采用了环形多波束换能器阵列分区探测方式, 避免了电机的使用, 监测仪结构得到简化, 可以将声探测系统的电路部份密封于浮标中, 提高了监测仪的抗风浪能力, 具备了全天候工作能力; 机械部件的消除, 还使海上供电要求降低, 只需采用 24 V 的蓄电池供电即可, 而且仪器功耗变小, 持续工作能力大大延长, 减少了海上装卸麻烦。

4 结 论

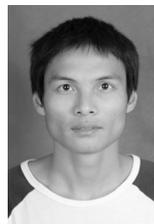
通过深水网箱养殖现场测试, 表明该仪器具有海上操作灵巧、易于安置、性能稳定的特性; 首次提出了利用环形多波束换能器阵列分区探测网箱的方法, 实现了深水网

箱中网衣安全和鱼群状态的远程、实时监测; 采用了基于回波能量积分法的深水网箱鱼群量估计算法, 可以根据声探测回波估计鱼群总量, 对网箱中出现的网衣破损、鱼群逃逸等异常情况示警, 减少养殖中的损失。在当前开展的深水网箱养殖技术中, 本系统(作为深水网箱配套设施关键技术)具有极其广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 刘晋, 郭根喜. 国内外深水网箱的养殖现状[J]. 渔业现代化, 2005, 2: 9-10.
LIU J, GUO G X. The status quo of deep sea-cage culture in China and Abroad[J]. Fishery Modernization, 2005, 2: 9-10.
- [2] ROBIN S B, LAM K K Y, YEUNG L F, et al. Real-time monitoring of fish activity on an inshore coral reef[C]. Oceans'05 MTS/IEEE, Washington. D.C, USA, 2005(1): 542-548.
- [3] MICHEL A P M, CROFF K L, MCLETTCHIE K W, et al. A remote monitoring system for open ocean aquaculture[C]. Oceans'02 MTS/IEEE, Biloxi, Mississippi, USA, 2002(4): 2488-2496.
- [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, 2008,1:13-17.
GUAN CH T, CUI G P, LI J, et al. The design and development of multi-angle view underwater monitor used for deep-sea cage culture[J]. Fishery Modernization, 2008, 1: 13-17.
- [5] 徐芳华. 深水网箱中水声鱼群监测系统研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2004:14-15.
XU F H. Study on an underwater acoustic monitor system for bred fish in net cages of deep water[D]. Xiamen: Univ. of Xiamen, 2004:14-15.
- [6] XU X M, ZHANG X K. A remote acoustic monitoring system for offshore aquaculture fish cage[C]. M2VIP 2007, Xiamen, Fujian, China, 2007:86-90.
- [7] 张小康, 许肖梅. 深水网箱中鱼群量统计方法研究[C]. 中国声学学会2006年全国声学学术会议, 2006(25): 455-456.
ZHANG X K, XU X M. Study on the statistic methods of fish's amount in net cages of deep water[J]. Proceeding of National Acoustical Conference of China, Xiamen, Fujian, China, 2006(25):455-456.
- [8] TANG Y, IIDA K, MUKAI T, et al. Estimation of fish school volume using omnidirectional multi-beam sonar: scanning modes and algorithms[J]. Japanese Journal of applied Physics, 2006,45(5B):4868-4874.

作者简介



张小康, 厦门大学在读博士研究生, 主要研究方向为水声遥测遥控。

E-mail: xiaokang_xmu@163.com

Zhan Xiaokang is a PhD student, majoring in underwater acoustic telemetry and control in Oceanography Department, Xiamen University.



许肖梅, 分别于1982、1988和2002年在厦门大学获得学士、硕士和博士学位, 现为厦门大学海洋系教授、博士生导师, 主要研究方向为水声通信、水声遥测遥控、水声信号处理等。

E-mail: xmxu@xmu.edu.cn

Xu Xiaomei received B. Sc., M. Sc. and PhD. degrees all from Xiamen University in 1982, 1988 and 2002, respectively. She is now a professor in Oceanography Department, Xiamen University. Her research interests include underwater acoustic communication, underwater acoustic telemetry and control, signal processing and etc.