

大动态、宽频带、三分量数字 海底地震仪 OBS863-1*

王广福 刘福田 徐礼国 冉崇荣
邵安民 张玉云 赵凤文

(中国科学院地球物理研究所,北京 100101)

摘 要

OBS863-1 是为研究中国大陆边缘及其海域的地壳和深部结构而研制的大动态、宽频带、三分量数字海底地震仪,它的动态范围不小于 120dB,频带宽度 0.05 ~ 10Hz。反馈地震计速度灵敏度 $5V \cdot s/m$,前置放大器放大倍率 1、8、32、64 四档,24 位 A/D 变换器灵敏度 $10^6 DC/V$;采样率分 15.625、31.25、62.5 和 125.0Hz 三档,最大工作水深不小于 3000m,采样率为 31.25Hz 时可连续记录 2 个月。

该仪器系统是由固定在沉耦架上的仪器舱、电源舱以及海底地震观测配套设备水声释放器和定时释放器、无线电信标机、闪光灯等组成。仪器舱内安装有固定在两自由度硅油阻尼常平架上的反馈地震计、前置放大器、24 位 A/D 变换器、PC 104 机和时间服务系统;海底地震仪为自给式供电,6 组 6V 锂电池放在电源舱中。此外,为海底地震确定方位的磁罗盘定向记录器也置于电源舱。仪器舱和电源舱之间通过水密插头实现电气连接。

海底地震仪投放时,海底地震仪与沉耦架一起以 0.8 ~ 1.0m/s 速度自由下沉到海底,沉耦架使海底地震仪与海底介质之间获得较好的耦合。回收时,指挥船发出释放指令,水声释放器动作,海底地震仪与沉耦架脱开,并靠自身浮力以 0.8m/s 速度升至海面。借助无线电信标机和闪光灯(夜间)对其进行搜索。定时释放器是为水声释放器失灵时采取的补救措施。

1998 年夏,该仪器系统与性能与之相同的陆上用仪器在我国东海和东南沿海的浙江、福建、江西进行了海陆联合地震观测试验。

关键词 海底地震仪,地震仪,地震观测

地球表面海洋面积占 70% 以上。许多地震震中就分布在海洋中。早在本世纪 30 年代末,Ewing 和 Vine(Ewing and Vine, 1938)就尝试过用海底地震仪进行海底地震观测。但是这项工作在以后几十年中并没有得到很大发展。至今全球范围内数以千计的地震台站都是分布在陆地上,海底地震观测仍处于初级阶段(Webb, 1998)。究其原因,海底地震观测技术复杂,难度大,地震学前期的发展尚未达到这样一个阶段,必须进行技术难度大、投入大、风险大的海底地震观测。但是随着技术的进步和地震学的发展,对这一问题的认识正在发生变

* 863 计划海洋领域 820-01 专题资助

化。

近年来,全球地震活动研究的丰硕成果,使得对地震活动过程的认识和震源运动学、动力学模型的发展有很大提高。特别是全球地震层析成像的结果,不但对地球动力学研究乃至整个固体地球科学的发展起到了巨大推动作用。这些成果的取得,都是建立在大量的地震观测数据基础上。为了提高全球地震观测台网的监测能力,美国在 80 年代中期提出了一项跨世纪的 IRIS 计划,在全球范围内建立起用现代技术装备的地震台站组成的世界数字地震台网(GSN),以取代 60 年代建立的模拟记录世界标准地震台网(WWSSN)和老的数字地震台网(如 SRO)。在技术上采用电子反馈地震计,地震仪周期可以向低频延伸乃至零频,采用 24 位 A/D 变换器和低于天然地动背景噪声的仪器噪声获得大动态和高分辨率;计算机处理速度和存储量的高速增长和信息传输手段的不断完善,为实现 IRIS 计划提供了可靠保证。但是,IRIS 计划不足之处是,全球数字地震台网台站在东太平洋和南半球海洋区域覆盖有空区,而且无法用海岛台站来弥补。

80 年代末,为了探讨在深海中建立永久性宽频带地震观测台网问题,美国的联合海洋学机构(JOI)和 IRIS 联合成立了海洋地震台网指导委员会。1995 年海洋地震台网指导委员会制订了一个海洋宽频带地震学五年计划。在该计划的海洋地震台网项目(OSN),重点发展两类海洋地震台网。一类是分布尽可能广泛的永久性地震台站,以服务于全球性课题。拟利用尚未利用的水下远程电缆供电和传输数据,计划先建立 3 个示范台站。另一类是重点研究海洋盆地地震活动性、结构和构造的区域性课题,发展实用型便携式宽频带海底地震仪,并建立小型宽频带海底地震仪台网(BBOES),以验证其作用(Kappel, 1995)。

我国的海底地震仪研制工作起步于 70 代末。80 年代,先后研制出用于浅海(200m)和深海(2000m)数字磁带记录海底地震仪,并参加了重大项目“中国东南大陆及相邻海域岩石圈结构、组成与演化”的海底地震观测工作(郝维诚, 1995)。

1996 年开始,在国家 863 计划资助下,我们开始研制宽频带、大动态、三个分量数字海底地震仪。1997 年底研制出样机,并通过了水陆联合地震观测试验的检验。在此基础上,经过改进,加工出 5 套试验用海底地震仪 OBS863-1,并于 1998 年夏在我国东海大陆架一选定水域布设小型海底地震观测台网,同时在东南沿海利用现有地震台站台基,架设性能相同的宽频地震仪,进行海陆联合地震观测试验。试验观测的目的是检验仪器性能,并为研究我国大陆边缘海及其邻域的地壳和深部地质构造提供观测资料。

一、OBS863-1 型海底地震仪结构

OBS863-1 型海底地震仪是为在水深小于 3 000m 的大陆架、大陆坡进行海底流动地震观测设计的。它采用自给式供电、自浮式结构。海底地震仪在水中具有正浮力,自海面投放海底地震仪时,需将其和有锚块功能的沉耦架固定在一起,自由下沉到海底,便开始连续记录地震,记录数据存储在自身携带的计算机硬盘中。回收海底地震仪时,需要从船上发出释放指令使海底地震仪与沉耦架脱离,海底地震仪靠其自身浮力上升、浮出海面。记录数据在计算机上进行回放。

海底地震仪结构见彩图 1(附书后),其主体是仪器舱和电源舱。它们是由可拆装的耐

压密封玻璃球做成,外罩以高强度工程塑料防护罩以防碰撞。玻璃球既可保护地震仪,又可产生上升所需浮力。仪器舱中安装有三分量地震计、数据采集器和时间服务系统。电源舱中放置4组+6V和1组±6V锂电池,并固定一个自记式磁罗盘。仪器舱和电源舱之间的电气连接采用耐压水密接插件。除仪器舱、电源舱外,海底地震仪还包括配套设备水声释放器、时控释放器、信标机、频闪灯。它们通过中连框、中连块和上连架刚性连在一起构成海底地震仪的可回收部分,在水中具有正浮力。它们再通过由不锈钢丝、尼龙绳、杠杆和调节螺栓组成的电蚀脱钩机构固定在上部为铝合金底部为铁质沉耦架上,在水中可自由下沉。有两种方法可使海底地震仪与沉耦架脱离,自由浮出海面。主要方法是借助水声释放器。水声释放器是由船载水上机和与海底地震仪固定在一起的水下机两部分组成,两者之间靠水声通信沟通。水声释放器有测距和遥控释放两种功能。当回收船只开到仪器投放点附近时,首先发出测距信号,当得到水下机应答测出距离后,水上机发出释放指令,水下机控制不锈钢丝加电,由于海水的电解作用使其蚀断,脱钩机构动作,海底地震仪与沉耦架脱离,自由上浮。如果水声释放器失灵,要靠备用的时控释放器。海底地震仪投放之前,给时控释放器预置释放时间,到时发出释放指令(这种方法用于长期观测很难保证回收船只准时到达仪器投放点,回收成功率很低)。海底地震仪浮到海面后的寻找,远距离(一二公里以上)靠方向性很强的无线电信标机,近距离(几百米)主要靠目视,夜间靠两个频闪灯。

二、OBS863-1型海底地震仪组成和主要技术指标

OBS863-1型海底地震仪系记录地动速度的宽频带速度仪,其主要技术指标与中国数字地震台网(CDSN)宽频带仪器相仿。频带宽度0.05~10Hz,动态范围不小于120dB,地震计灵敏度 $6V \cdot s/m$,A/D变换器灵敏度 $10^6 DC/V$ 。

与陆地台站地震仪相比,除地震计是共同的之外,海底地震仪必须有配套设备,以确保海底环境条件下仪器投放、就位、记录和回收获得成功。就地震计本身而言,达到相同技术指标用于海底的地震计要比陆上困难得多。主要表现在:(1)海底地震计必须密封在耐压玻璃球内,并且要有足够的浮力,因此仪器的体积、重量、功耗受到限制;(2)海底观测的台址不能直接选择,仪器的倾斜难以避免,故需把地震计置于常平架上;(3)海底地震计不能在原位进行安装、调平衡位置,也不能设定水平分量方位;(4)海底地震计不能直接和海底介质接触,而是通过常平架、玻璃球、防护罩、沉耦架等,连接刚度有限,存在耦合问题;(5)海底介质情况差别很大,极少有基岩裸露情况,而以砂、软泥居多。海底地震仪与海底松软介质之间耦合问题至今仍是海底地震仪设计中不断探讨的难题;(6)底层海流的影响,必须考虑海底地震仪外形设计。

上述问题成为海底地震仪设计的基本出发点

1. 三分量海底地震计

三分量海底地震计是将三分量摆固定在两自由度硅油阻尼重力作用的常平架上,自成一密闭系统。当该系统倾斜在 15° 范围以内时,仍能保证摆的水平位置变化小于 1° 。水平分量的方位角由单片机控制的自记式磁罗盘记录,每6小时记录一次,字长8位,回收后由微

型打印机输出。

三分量摆的周期为 1.85s,采用动圈式速度换能,并联 40 μ f 电容延长摆的周期。采用电动标定与振动台标定得出幅频特性如图 1。

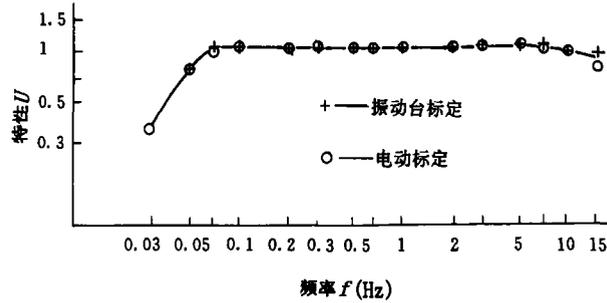


图 1 海底地震仪标定幅频特性

与有源反馈延长摆的周期方法相比较,减小了体积,无需供电减轻了重量,降低了功耗,同时有助于提高摆的稳定性。

2. 数据采集器

OBS 863-1 型海底地震仪采用的是 SCT-1 型数据采集器。它是通用型地震记录器,具有动态范围大、频带宽、存储量大、体积小、重量轻、功耗低、自动化程度高等优点,不但可以用陆上,也适用于海底地震观测。

SCT-1 有 4 个通道,其中 3 个数据通道对应于三分量地震计,1 个通道为时间道。它们主要是由前置放大器、模数转换器、缓冲存储器、接口电路、PC 104 机、数字钟以及标定电路等组成(见图 2)。三分量地震数据和相应的时间码存放在两个交替工作的缓冲存储器 RAM 中,当一个存满 512k 后,另一个工作,并启动 PC 104 机,对其进行处理,最后以数据文件的

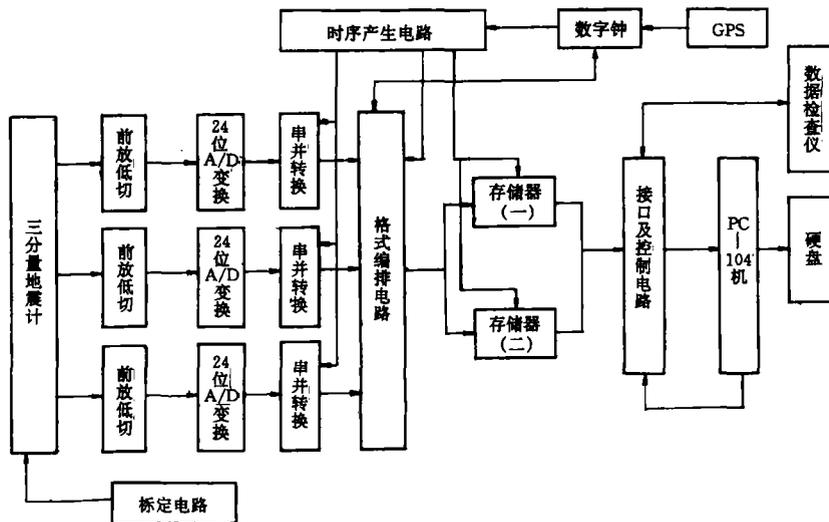


图 2 海底地震仪数据采集器原理图

形式存入硬盘。系统软件用汇编语言编程,以提高数据传送速率,减少 PC 104 机工作时间,降低功耗。

(1)前置放大器

前置放大器采用低噪声运算放大器,低切滤波,平衡或单端高阻输入,输入端噪声小于 $\pm 0.25\mu\text{V}$,放大倍率 1、8、32、64 四档。

(2)24 位模数(A/D)转换器

采用增量调制编码型(Σ - Δ)过抽样、数字滤波和抽取新技术,制成分辨率为 24 位,动态范围可达 120dB、超低失真的新型 24 位模数转换器。其优点是易于与数字信号处理系统单片集成,无需外接采样保持电路,对其输入端抗混叠滤波器要求降低;由于采用数字滤波技术,当采样率降低时,可滤除带外量化噪声。

(3)缓冲存储器

为了进行连续记录和节省功耗,采用 2 个交替工作的静态随机存储器(RAM)作为缓冲存储器,容量分别为 512kB、1MB 两种。加电后,PC 104 机处于断电状态。当一个 RAM 选中后,开始存储由 A/D 转换的地震信号数字量以及帧头和时间码。当其存满 512kB 后,另一个 RAM 开始工作,并同时启动 PC 104 机,经延时,将缓存数据以 8kHz 速率送至 PC 104 机内存,经过数据压缩处理,将 3 道地震信号(96kB \times 3)和时间道(32kB)共 320kB 有效信号以数据文件的形式存入硬盘,而后 PC 104 机断电处于等待状态,直到另一个 RAM 存满 512kB 后,重新启动。

2 个静态随机存储器 RAM 由地址计数器和片选信号控制,而其分时工作是由触发器、延时器支配。

(4)数字编码钟

数字编码钟(数字钟)选用 1024 kHz 温补晶振作为时间信号源。其稳定度为 $\pm 3 \times 10^{-7}$ (0~40℃),由低功耗 CMOS 电路组成分频、计数、编码以及译码驱动等电路,产生所需之各种功能:为 A/D 变换器提供 512kHz 频率基准;产生天(0~99 天)、时、分、秒和 0.01 秒时间编码,连同时间识别码,分作 6 个字节分时输出,串在数据码中;为 8 位液晶显示提供时、分、秒和 0.01 秒时间码;每天定时输出一时间脉冲,通过标定电路为地震计提供标定信号;每分钟有一脉冲输出,用以与标准时间脉冲(来自 GPS)进行对比或自检;可由授时 GPS 标准信号或母钟同步启动和定时;可与综合检查仪配套使用,以检查数字钟工作状态。

(5)接口及控制电路

接口与控制电路是由三态门、与门、或门组成。其功能是把随机存储器输出的串行码变成能够为 PC 104 机并行口接受的形式。

(6)PC 104 机

在数据采集记录器中 PC 104 机功能作为数据记录器。考虑到功耗、硬盘容量以及体积故选用 S104 386 SX 型号,其特点是双向并行口,两个串行口,348kB 固态盘,低功耗,易于扩展。

(7)标定电路

标定电路的功能是为三分量地震计摆的标定线圈提供正、负方波脉冲标定信号。标定电路是由延时器、多路开关、放大器、相加器等组成。可用手动或定时控制两种方式产生持

续时间为 3.2 秒正脉冲,延时 1 分钟后再产生相应的负脉冲,分时送至三分量地震计标定线圈,完成标定任务。

数据采集软件用汇编语言编程,数据采集存盘程序流程图如图 3 所示。为防止数据丢失,随机存储器中存满 512kB 的数据全部存入内存,经过压缩处理——去掉帧头,解出时间码,将时间道数据和三分量地震记录数据以数据文件形式存入硬盘。

采集程序采用查询方式。当 PC 104 机电源接通后,由硬件延时 32~60 s 后,由控制电路向 P₂₃ 口发送采集脉冲。在其下降沿读来自缓冲存储器的数据(字节),根据数据特征和通道特征,将其分别存入各自数据区(1、2、3 通道和时间道),当 1、2、3 通道存满 96kB、时间道存满 32kB 后,根据当前时间和观测点位置,生成相应的文件名,建立文件,把相应通道的数据存入相应的文件中,先存 C 盘,后存 D 盘(硬盘)中,关闭文件,而后回到 DOS 状态,关电源。缓冲存储器中 512kB 数据存到 PC 104 机硬盘中所需时间约为 2 分钟。在采样周期为 32ms 时相应记录时间为 $17\frac{1}{15}$ 分。

3. 海底地震仪配套设备

海底地震仪配套设备系指确保海底地震仪成功回收所需之设备,包括水声释放器、时控释放器、无线电信标机、频闪灯等。

4. 综合检查仪

综合检查仪是海底地震仪数据采集器的检查设备。海底地震仪在仪器舱封球之前,或在陆上地震观测现场,可检查数据采集器短路噪声、正弦波信号、方波标定信号以及地动噪声,从而确定数据采集器乃至整个系统运行状态。

综合检查仪主要功能有:采用 MM/LCD 液晶显示器,通过液晶显示屏显示数据与波形;能独立地为地震计提供正负脉冲标定信号,并从显示屏上显示系统响应波形,以确定数据采集器电路系统在随机存储器之前的工作状态;可以从 RAM 中采集 64kB 数据并存入内存,通过三态控制开关可以显示三种不同形式的

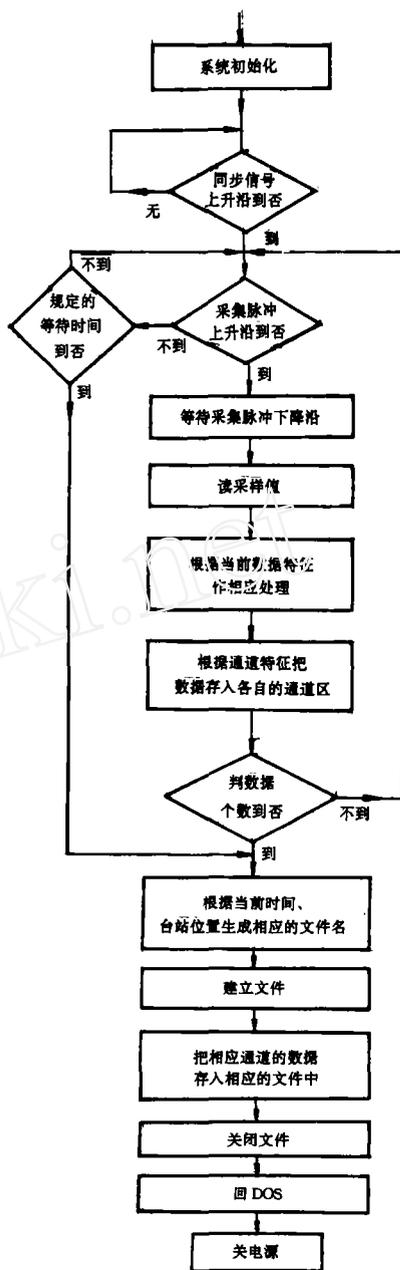


图 3 数据采集、存盘程序框图

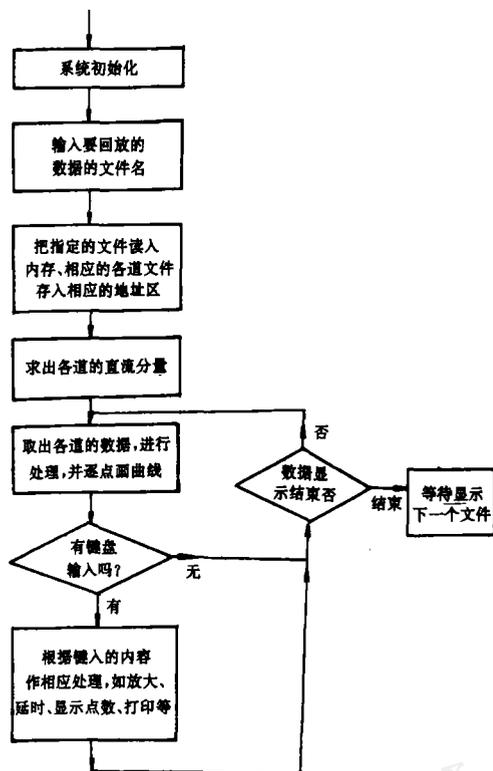


图4 地震数据回放流程图

数据:没有经过压缩的原始记录数据,即包括帧头、三道数据码和一道时间码,显示记录时间码,显示检查仪内部标准数字钟时间码,由后二者可以读取钟差;显示硬盘一次记录的4个数据文件(三道数据,一道时间码)。

5. 记录回放设备

OBS863-1 海底地震仪的记录数据和相应的时间码是以数据文件的形式存放在 PC 104 机硬盘上。数据文件的名称 8 位,包括观测点名称 2 位,PC 机启动时的月、日、时各 2 位,扩展名 3 位,前 2 位表示 PC 机启动时的分,最后一位 0 表示时间码文件,1 表示南北分量,2 表示东西分量,3 表示垂直分量。回放时需在 PC 104 机上将相应的数据文件拷贝到软盘上。借助回放软件,可用在任何 PC 机或工作站上回放出记录波形。

回放流程图如图 4 所示。

三、试验与观测

海底地震观测是一项综合性高技术。与陆地观测相比,虽然都是用地震仪观测地震,但海底地震仪要复杂得多,可能导致观测失败的诸多因素,还往往不是源于地震仪本身。海洋环境复杂,不确定因素多,加之,海底地震观测经验比陆地少得多,因此观测难度之大,可以想见。

为减小海底地震观测风险,提高海底地震仪回收成功率和提高地震记录可靠性,始终作为海底地震仪研制的两大基本目标。为此,在仪器研制过程中对影响仪器回收和记录可靠性的关键技术环节反复进行试验。进行过的主要试验有:

对与海水相接触的海底地震仪的所有零、部件及配套设备全部在高压容器中进行水静压试验,压力 35~40MPa(相当水深 3 000~4 000m),保压 1 小时;

三分量地震计振动台标定实验,检查其频率特性、灵敏度、摆平衡位置稳定性以及记录的非线性失真等;

海底地震仪水箱模拟试验,包括浮力、平衡、投放自动脱钩、电蚀释放机构,以及在自配海水中的抗腐蚀、机械性能稳定性等。

水声释放器作用距离及其可靠性试验。分别在河北省岗南水库和青岛胶州湾海上试验,498~4100m 距离进行 27 次试验,除 5 次操作上的原因外,其余测距、释放均获成功。

频闪灯作用距离试验。在岗南水库和尔王庄水库进行可视距离试验。作用距可达 1.5~2km。

无线电信标机方向性及作用距离试验。2km 以远,方向性好,信号清楚,近距离(1km 之

内)方向角偏大(60~90°)。通过耳机的听力训练,可提高方向性的分辨能力。

北京地震台连续观测。其目的是:两台仪器同时记录,检查其一致性;考察仪器连续工作可靠性;与中国数字地震台网(CDSN)和华北地震台网同类型宽频带仪器进行对比。

在完成样机研制和进行上述一系列试验的基础上,于1997年11月在河北省平山县境内的岗南水库进行了一次水陆联合地震观测试验。其目的是通过在水底布设宽频带数字记录海底地震仪样机2台和在岸边布设同类陆上地震仪(2台),记录水库周围地区的近震以及远震,模拟海陆联合地震观测全过程,检验海底地震仪及其配套设备性能和可靠性;在此基础上进一步完善海底地震仪系统设计,为1998年夏天将要进行海陆联合地震观测做好仪器准备。

试验内容有海底地震观测全过程的演练,包括仪器岸边(码头)实验室内的安装,调试,运输,装船,投放,记录地震,水声释放,定时释放,无线电信标机水面搜索,仪器的回收,地震记录的回放等;地震记录对比,岸边与水底、水陆联合地震观测结果与河北省地震局台网记录对比。

试验过程中,两次回收海底地震仪分别遇有大雾天(11月10日)和大风降温(11月16日)天气。但演练过程获得成功。试验期间,成功地记录到11月8日西藏玛尼7.5级大地震。鉴于国内没有别的海底地震仪可供比较,我们选用了CDSN和华北数字地震台网的同类型仪器数字地震仪的记录进行了比较,结果表明海底地震仪记录良好。

1998年夏,在我国东海大陆架和东南沿海地区进行了海陆联合地震观测试验。在海底布设5台OBS 863-1海底地震仪,在陆地利用现有4个地震台站湖州、建德、上饶、南坪,布设性能相同的宽频带地震仪进行观测。

OBS863-1型海底地震仪的研制工作是国家高技术发展计划(863计划)海洋领域资助的课题820-01-04“海洋岩石层三维地震成像技术”工作的一部分。课题从立项论证到具体实施,一直是在刘光鼎院士指导下进行的。作者对刘光鼎院士的关心与指导深表谢意。

参 考 文 献

- 郝维诚、徐礼国、冉崇荣等,1995,HS海底地震仪,地球与空间科学观测技术进步——庆贺秦馨菱院士八十寿辰,地震出版社,190~200
- Ewing, M., and A. Vine, 1938, Deep-see measurements without wires or cables, EOS Trans. AGU, 19(1), 248~251
- E. Kappel, 1995, The ocean seismic network: Broadband seismology in the ocean, IRIS-2000, A science facility for studying the dynamics of the solid earth, Section III: Programs and Implementation Plans III 71~III 73
- S. C. Webb, 1998, Broadband seismology and noise under the ocean, Reviews of Geophysics, 36(1), 105~142

THREE-COMPONENT BROADBAND LARGE-DYNAMIC-RANGE SEISMOGRAPHS OBS863-1

Wang Guangfu Liu Futian Xu Liguo

Ran Chongrong Shao Anmin Zhang Yuyun Zhao Fengwen

(*Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101*)

Abstract

OBS863-1 three-component broadband large-dynamic-range ocean bottom seismograph is developed for studying seismicity and crustal and deep earth structure in marginal sea area of Chinese continent. It has a dynamic range greater than 120db, frequency band 0.05 ~ 10Hz. The velocity sensitivity of the feedback seismometer is $5V \cdot s/m$, the amplifications of preamplifier is 1, 8, 32, 64, sensitivity of 24-bit A/D converter $10^6 DC/V$, sampling rate 15.625, 31.25, 62.5, and 125.0 Hz selectable. The maximum working depth is not less than 3000 meters. At a sampling rate of 31.25 Hz continuous recording can last for two months.

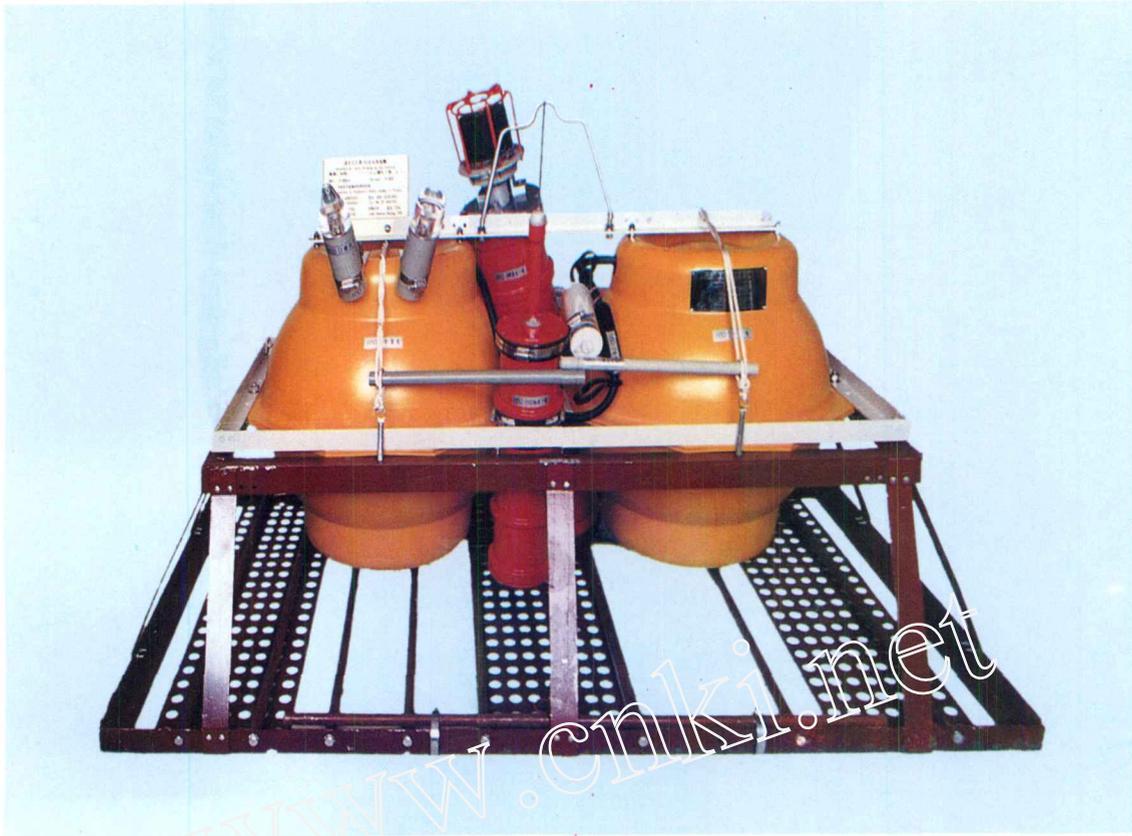
The whole system is composed of an instrument capsule and a power supply capsule, fixed to a steel anchor frame, with other matched devices for sea bottom observation, including an acoustic release a time release, a radio beacon, and strobe lights. The instrument capsule contains the feedback seismometers, which are fixed to a silicone oil damped self-leveling frame, preamplifiers, 24 bit A/D converters, a PC 104 computer, and the digital clock. The instruments are powered by six sets of 6V lithium batteries placed in the power supply capsule. In addition a magnetic compass recorder for determining the orientation of the OBS is also inside the power supply capsule. The instrument capsule and power supply capsule are interconnected through water-tight cable and connectors.

For deployment of the ocean bottom seismograph together with steel anchor frame sink freely down to the sea bottom at a speed of 0.8 ~ 1.0 m/s. The steel anchor frame makes a suitable coupling between the seismometer and sea bottom. On recovery a release order issued from the vessel activates the acoustic release, the seismograph is then disjointed from the frame and buoyed up at a speed of 0.8 m/s to the sea surface. It is then searched and recovered with the aid of radio beacon and strobe lights. The time release affords a supplementary means in case the acoustic release fails.

This paper represents the result of a sea-land joint observation with the ocean bottom seismographs in the East Sea of China and other similar instruments on the land in Zhejiang, Jiangxi and Fujian Provinces of China.

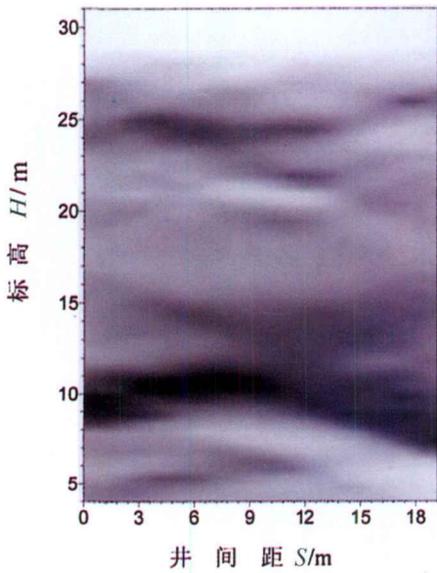
Keywords OBS, Seismograph, Seismological observation

王广福等：大动态、宽频带、三分量数字海底地震仪 OBS863-1

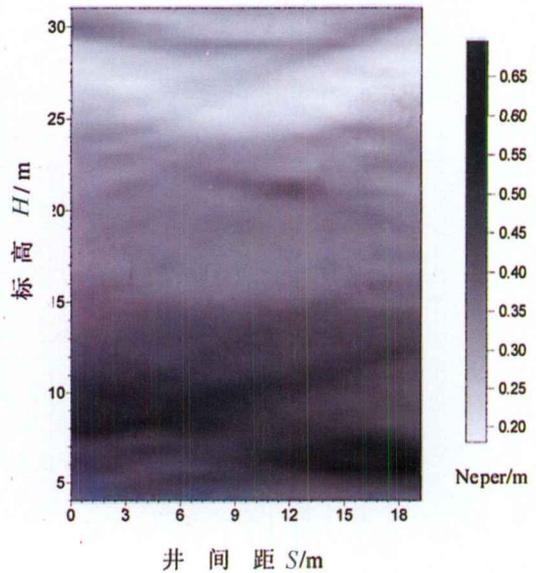


彩图 1

曹俊兴等：电磁波层析成像的新方法



彩图 1 双频电磁波电导率层析图



彩图 2 单频电磁波吸收层析图