

HS1 海底数字地震仪

郝维城 徐礼国 冉崇荣

张玉云 陈岳忠

(中国科学院地球物理研究所, 北京)

摘 要

HS1 海底数字地震仪是为探测海洋地壳深部构造而研制的, 由主机数字化测震系统及附属的投放和回收装置组成。经微机测试, 主要性能指标为: 输入端噪声电压 $0.1 \mu\text{V}\cdot\text{rms}$; 动态范围 119 dB; A/D 和 D/A 12 位; 通频带 0.2—25 Hz; 线性优于 1%; 谐波失真 $< 1\%$; 串音 < -119 dB; 时间服务准确到 0.01 s; 等待功耗 1.1 W; 记录功耗 3.3 W。能同时输出模拟和数字信号, 便于送微机预处理。本文着重介绍该机的组成和工作原理, 并给出了海上实验获得的地震剖面图。

一、引 言

随着地壳深部构造研究的逐步发展, 以及开发海洋资源的需要, 许多国家日益重视并相继开展了对占地球表面 70% 左右的海洋地壳构造的研究。海底地震仪是用折射和反射地震波法来研究探测海洋地壳深部构造的重要观测仪器。

我国海域辽阔, 海岸线长, 蕴藏着丰富的矿藏资源; 而海洋地壳深部构造, 特别是大陆架的深部构造研究, 还处于起始阶段, 因而, 研制性能优良的观测仪器有着重要的意义。为此, 1979 年底我们开始了海底地震仪的研制, 到 1981 年底研制成两套样机, 先后进行了三次野外试验。在此基础上, 于 1983 年又完成一套小型化样机。

海洋人工地震测深的观测方法与陆地上所采用的方法有许多不同。它是采用单点仪器观测(一台或几台仪器组成阵)、多点激发的方式。人工震源(通常用船载的气枪或炸药)沿着设计的剖面, 在每个预定的位置上放炮激发, 由投放在剖面一端海底的地震仪记录下每次激发产生的地震信号, 仪器的回收, 由作业船在仪器投放点附近, 用水声遥控^[1], 或由仪器内部的定时钟, 发出信号, 使装有观测仪器的耐压密封容器与沉块分离, 浮到水面, 进行打捞。在整个观测过程中, 海底地震仪是在水下无人管理的情况下进行工作, 连续工作时间长, 记录炮数多, 地震信号很微弱易受干扰。海洋人工地震测深的这些特点, 对仪器的整机结构、测震系统的性能、体积、功耗及耐压密封等提出了特殊的要求。这在设计时应逐一满足。

二、整机结构

HS1 海底数字地震仪的整机采用了自由沉浮式的结构^[2] (图 1), 其特点是仪器向海底投放和回收都比较方便。整机包括两部分: 一是耐压密封容器, 全部测试仪器和换能器都封装在容器内部及表面, 安装后容器有足够上浮力; 另一部分是沉块, 它也兼作容器支架。这两部分用释放执行机构刚性联结成一体。整机有足够的下沉力, 便于向海底投放。当接到释放指令后, 容器与沉块分离, 靠上浮力升到水面。释放执行机构, 开始采用爆炸螺栓式。在小型化样机中, 改进成使用安全、成本低电的电腐蚀式, 用声学遥控和双定时钟同时控制释放。经多次野外试验和实验室的模拟试验, 两种执行机构的工作均很可靠。例如, 在 30 次电腐蚀模拟试验中除开始三次因漏电和操作失误而引起释放机构工作失常外, 其余全部成功。

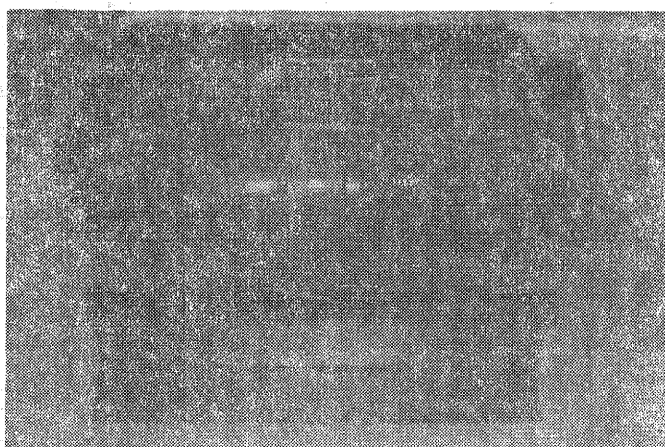


图 1 HS1 整机图

三、数字化测震系统

HS1 海底数字地震仪由数字化测震系统、耐压密封容器及投放和回收装置等组成。本文将着重介绍测震系统的工作原理及主要性能。

为满足海上人工地震测深的需要, 在 HS1 海底数字地震仪中, 采用了带瞬时浮点放大的、用定时程序控制磁带机启停的数字化测震系统。时间服务用精度高的数字编码钟, 并采用脉冲定时; 数据回放时可同时输出数字和模拟信号, 并可与计算机连接。

整个系统由拾震器、数据采集记录器(图 2)及回放解调器组成。

图 3 为数据采集记录器的原理图。拾震器将地震信号转换成模拟的电信号, 经前置放大、滤波和瞬时浮点放大后, 得到通频带以内的幅度适宜的模拟信号。通过采样保持、A/D 转换和并/串变换变成串行的二进制数字码, 经写电路和四轨数字磁头将地震信号数字码、阶码、时间码和字、位同步码分四路记录在磁带上。在回放时, 恢复出记录在磁带上的地震信号和时间码, 并以模拟和数字两种形式输出, 供分析处理用。

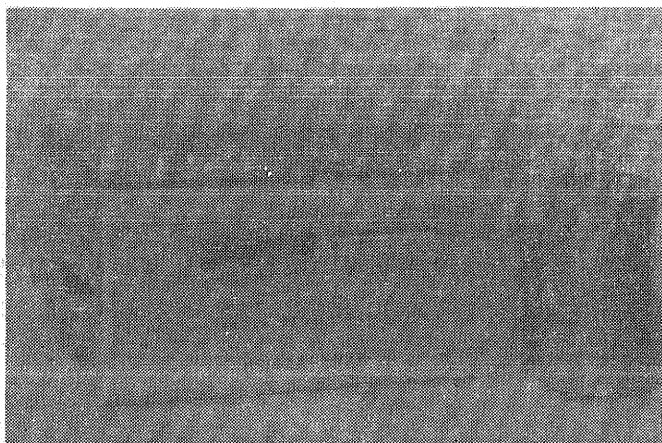


图 2 数字化测震系统外形图

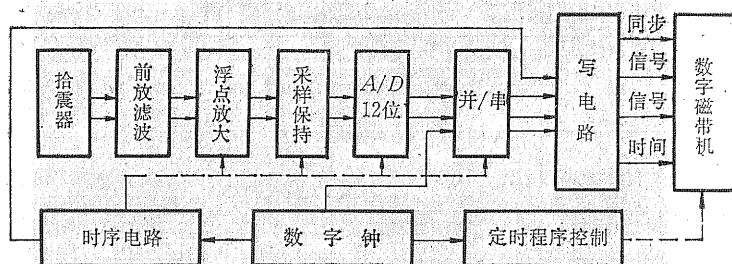


图 3 数字化测震系统原理图

1. 拾震器 有两种类型：一种是水听器，它将由地震引起的水压变化转换成模拟电信号，因以水作传播介质，只能测量纵波，灵敏度为 $70 \mu\text{V}/\mu\text{bar}$ ；另一种是经稍加改进的 LS-1 型地震计，参数为：固有频率 $f_0 = 2 \sim 4.5 \text{ Hz}$ ，灵敏度为 $6 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{cm}$ ，内阻约 $14 \text{ k}\Omega$ ，阻尼 0.7，增加了标定线圈，便于野外检测。

根据需要，可用水听器和竖直向地震计来记录一道纵波和一道竖直向的地震信号；也可以用一个水平向地震计和一个竖直向地震计来记录两个分向的地震信号。

2. 前置放大和滤波器 前置放大器和有源滤波器均采用低噪声运算放大器。前放的增益为 40 倍，系统输入端噪声电压为 $0.1 \mu\text{V} \cdot \text{rms}$ 。采用三级二阶有源低通滤波器，高频端截止频率为 25 Hz，衰减陡度为 36 dB/oct。隔直电容高通截止频率为 0.2 Hz。系统的幅频特性低频端由拾震器决定，高频端由低通滤波器决定。

3. 瞬时浮点放大 海洋人工地震测深的炮点多，观测距离（从 1 公里到 100 多公里）和药量（从 1 公斤到 100 多公斤）变化大，爆炸地震效应又很难精确计算。考虑将来可用于观测天然地震，需要扩大系统的动态范围，提高 A/D 转换精度，采用了瞬时浮点放大技术，使系统的增益能随着输入信号幅值的大小随时进行调整。它有三级放大器，每级增益为 2^3 ，增益可调范围为 54 dB。增益选择由接在每级放大器输出端的三个比较器 (B_1, B_2, B_3) 和逻辑电路来完成（图 4）。增益选择过程为：前放滤波输出的信号，送到浮点放大器后，分别被放大 2^3 、 2^6 和 2^9 倍。共有四种不同幅值的信号，它们被送到相对应的

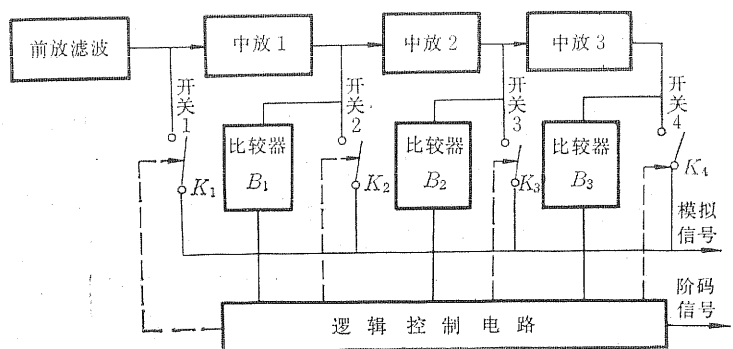


图 4 瞬时浮点放大原理图

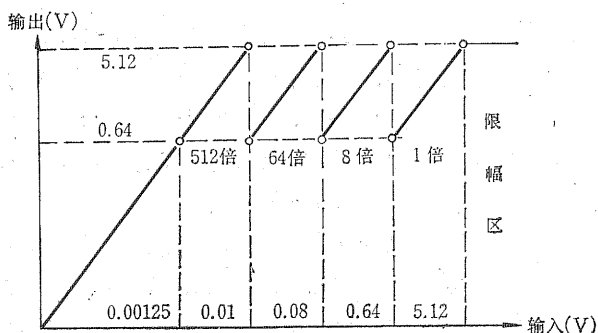


图 5 输出幅度示意图

比较器和四个开关 (K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4) 上。当放大器输出信号的幅值超过参考电压时, 比较器输出为“1”, 反之则为“0”。三个比较器输出全为“0”时, K_4 接通; 当 B_3 输出为“1”时, K_3 通; B_3 、 B_2 输出为“1”时, K_2 通; B_1 、 B_2 、 B_3 输出全为“1”时, K_1 通。由 K_4 、 K_3 、 K_2 、 K_1 输出的信号分别被放大 40×512 、 40×64 、 40×8 、 40×1 倍。每次增益变换时, 也将表示增益量的阶码送到逻辑电路, 在采样的同时送到并/串变换电路, 和尾数一起记录在磁带上。每个增益选择, 比较器只进行一次比较, 线路简单可靠, 调整速度快。

当浮点放大器输入端信号低于 0.01 V 时, 工作在全放大区; 在 0.01—5.12 V 时, 工作在增益自动调整区。使其输出信号的幅值在 0.64—5.12 V 之间, 从而使 A/D 转换器的转换精度得到提高, 并使其动态范围达 120 dB (图 5)。

4. A/D 和并/串变换 由瞬时浮点放大器输出的信号, 经采样保持, 将连续模拟量变成离散量, 而后将每个样品送到 A/D 转换器, 转换成相应的数字量。A/D 输出为 12 位, 称尾数, 连同 3 位阶码和 1 位标志位共 16 位组成一个字。经并/串变换后, 以串码形式经写电路、四路数字磁头记录在磁带上。

每道的采样率为 100 次/s。A/D 转换器为单片 CMOS 电路 ADC1210 型, 其参考电压为 10.24V, 分辨率 12 位, 线性 1/2 LSB, 输出为偏移二进制反码。

5. 定时程序控制 一次海上人工地震测深大约需 10 小时, 所记炮数几十炮至几

百炮不等。数字记录因受记录密度限制,带速不能太低。若用带速为 4.75 cm/s 进行连续记录,一盘 360 m 长的磁带只能工作两小时,很难满足海上观测的要求。因而采用了定时程序来控制磁带机的启停,进行间歇式记录,使磁带机的运行与人工震源的激发保持同步。这样不但充分利用了有限长的磁带,满足了观测记录的要求,而且也降低了系统的功耗。

定时程序是由数字钟提供时间码和基准信号,通过计数与拨码开关的预置数进行比较而产生的。其主要功能有:首次启动时间,可在 1 分—24 小时内任选某一值;相邻两次启动的间隔选择范围为 1 秒—59 分 59 秒;每次记录时间在 1—59 秒任选;可调启动次数 1—999 次,根据磁带长度和每次记录时间任选一值。控制程序用拨码开关来预置,操作方便。

为了可靠地工作,在首次启动信号到来之前,线路处于“封闭”状态。即使出现误启动,待首次启动指令发出后,磁带机的启停仍按预置的时间程序进行。

6. 时间服务 为了提高时间服务的精度,选用温补 1 MHz 晶体振荡器、CMOS 集成电路及液晶显示器组成数字编码钟。稳定度 $\pm 3 \times 10^{-7}$ (0—40℃)、功耗约 0.1 W。主要功能有:供磁带记录的串行时间码;时—0.01 秒 8 个字显示;整分脉冲输出;置时、置分及清零等。除了可用中央台整点授时信号对时外,还可用母钟及记录爆炸零时的数字钟输出的时间脉冲进行比对,确定钟差,提高对时精度。

7. 数字磁带记录 数字磁带机用 CJ-1 型盘式机的走带机构配上四轨数字磁头和读写电路改制而成。带速为 4.75 cm/s,带宽 0.635 cm,带盘直径 12.7 cm。

串行记录四轨信号。其中两轨记地震信号,一轨为时间码和放炮序号,一轨为同步信号(字同步和位同步)。

为解决磁带机低速运行时抖动大(3%)、读出信号幅度小且调制度高(可达 66%)等问题,设计了简单可靠的改进型归零制读写电路^[3,4],使磁带机在记录密度为 850 BPI、带速为 4.75 cm/s 时仍能可靠工作。

四、仪器安装

拾震器、数据采集记录器、电源及其它的电子仪器全被封装在容器内或表面。除要求容器结构紧凑外,还要保证仪器能正常工作,互不干扰,能抗冲击。

海底是不平坦的,整机沉到海底会发生倾斜,以致于地震计不能正常工作。因此,将地震计安装在有阻尼的常平箱里,使整机倾角在 55° 以内时,地震计始终保持竖直,处于正常工作状态。另外,在磁带机与支架间采用了泡沫塑料隔振,以消除磁带机运行时所产生的振动干扰和减少仪器沉到海底时所产生的冲击的影响。

为了消除海流引起的振动干扰,除了选择合理结构和降低整机重心外,主要提高沉放架与海底的耦合刚度,使其耦合频率远远高于信号频率。

整个测震部分体积小、功耗低,也可用在陆地上人工地震测深和其它低频数据采集记录。

五、数据回放及预处理

在实验室,通过数据回放器和微机对地震记录进行回放解调和预处理,其工作原理见图 6。

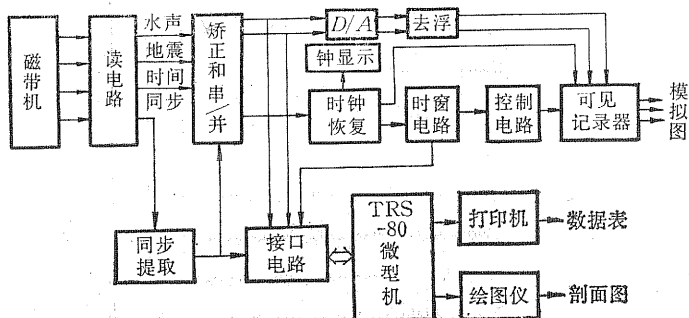


图 6 数据回放原理图

首先经过读电路,把记录在磁带上的磁信号恢复成电脉冲信号。而数据回放能否正常进行,其中关键是正确建立同步信号;另外还要对各路的脉冲信号进行相位校正。

由于普通的归零制本身不具有自同步(位同步)的能力,所以在编码格式中,单独用一道作为同步道。在回放时通过同步提取电路和同步校验,建立正确的字同步和位同步。

由于机械精度和电气性能的影响,使四道信号在录放过程中产生不可避免的相互间相位扭斜,因而必须加扭斜校正电路。利用同步信号对其它各道进行校正,得到相位一致的四路信号码,再经串/并变换,形成各自的并行编码。

时间恢复电路把时间码恢复成记录时的时间信号时、分、秒、0.1 秒和 0.01 秒及炮序号,并通过显示电路加以显示。同时也提供各种时间信号及控制信号:

- (1) 控制模拟回放时的拍摄时间及长度;
- (2) 模拟记录图上的绝对时间(时、分、秒)和相对时间(10 Hz、100 Hz);
- (3) 微机读取信号及工作时间的“时窗”信号。

时间恢复电路同时提供记录时间和炮号,为在多炮记录中查找信号带来了方便。

并行地震信号码,一是经 D/A 变换器及去浮电路恢复出原模拟信号,供可见记录。D/A 单片 CMOS 集成电路,型号为 DAC 1200,主要性能为:标准电压 10.24 V,分辨率为 12 位,线性 $\pm \frac{1}{2}$ LSB。二是通过专门设计的接口电路连同其它各种辅助参数一并送入微机进行预处理,打印出各种数据及表格,绘制地震剖面图,对原始数据进行数字滤波及频谱分析等。原始数据及预处理后的数据,存储在软磁盘上。

六、野外试验

1981 年 5 月、11 月和 1982 年 6 月,先后在云南抚仙湖、南海大亚湾和担杆岛海域进

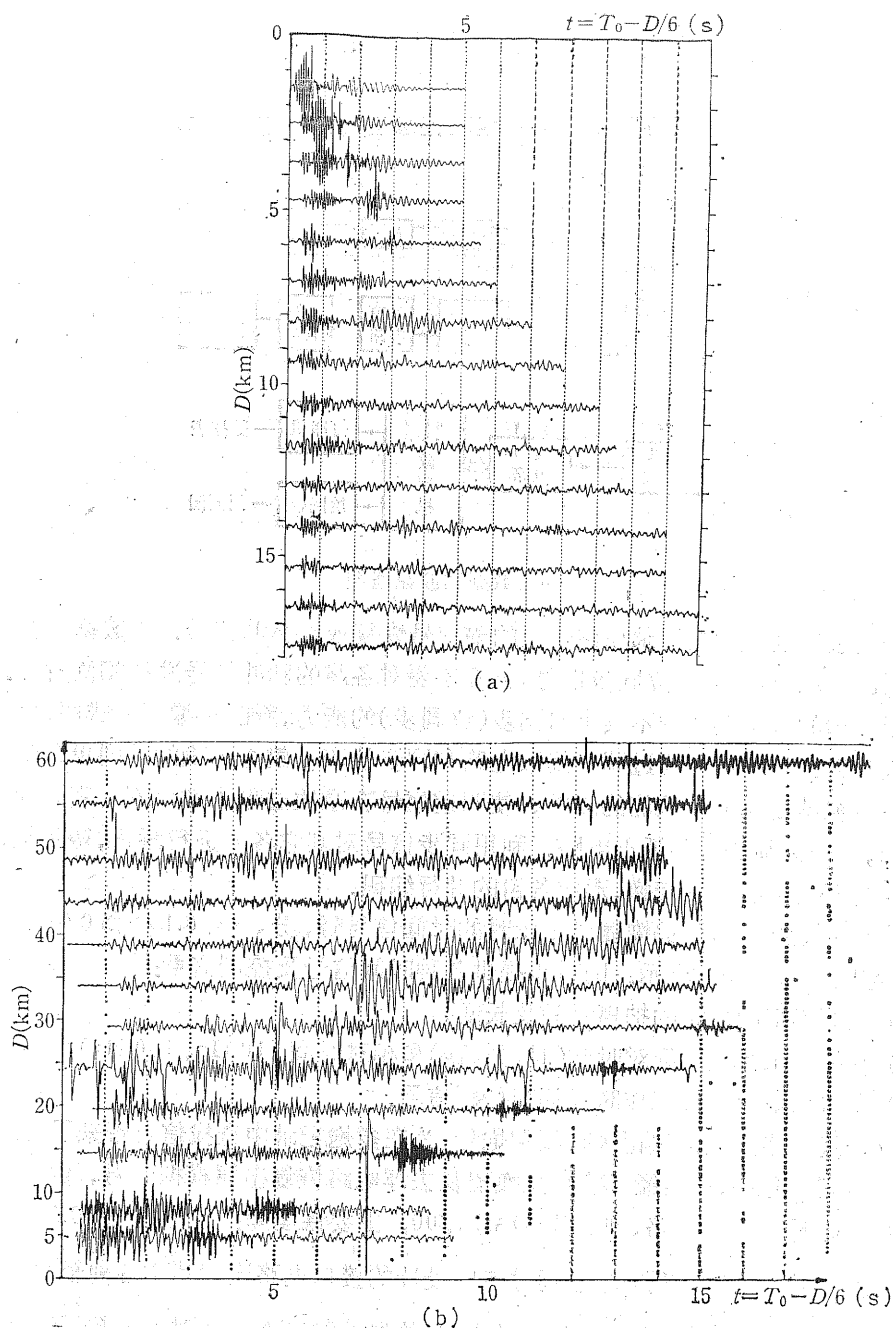


图 7 海上试验地震剖面图

(a) 1981年11月30日大亚湾海域, 炸药3—10 kg, 距离1.454—17.630 km;

(b) 1982年6月25日担杆岛海域, 炸药10—50 kg, 距离4.842—60.014 km.

行了三次野外试验, 均取得了满意的地震信号记录和爆炸零时记录。水声遥控释放回收, 试验五次, 测震系统在海上试验了10条测线, 均全部成功。(只是在抚仙湖仪器性能试验时, 有一次因错接一线未取得记录)。经回放及微机预处理, 绘出了地震剖面图(图7)。

在南海两次人工地震测深试验中,海底地震仪和炸药震源的投放,以及爆炸零时的测量,都是在卫星导航实验船上进行。定位误差 ≤ 50 m, 距离误差 $\leq \pm 2$ m。相同的两套测震系统,一套投入海底测量爆炸地震信号;另一套用来测量爆炸水声直达波到达船体的初动到时 t_p , 由卫导设备给出炸药投放点与零时的观测点间的距离 D , 水声波速为 c , 得出水声波的走时为 $t_c = \frac{D}{c}$, 爆炸零时为 $t_0 = t_p - t_c$ 。

两个系统的不一致性误差 ≤ 3 ms, 初动到时读数误差 $\leq \pm 5$ ms, 距离和水声波速引起的走时误差分别 $\leq \pm 1.3$ ms 和 0.5 ms, 数字钟给出的时标, 经内插修定后的误差 $\leq \pm 0.6$ ms。上述各项误差, 可按均方根法合成, 得出总的时间服务误差 $\leq \pm 6$ ms。

七、主要性能指标

在原试验样机基础上小型化后, 研制样机的性能指标如下:

1. 主机——HS1 数据采集器

- (1) 输入端噪声 $\leq 0.1 \mu\text{V rms}$ 。
- (2) 最大输入信号 0.25 V p-p 。
- (3) 动态范围 ($S/N = 1$) $\leq 119 \text{ dB}$ 。
- (4) 通频带 $0.2\text{--}25 \text{ Hz}$ 。
- (5) 每道采样率 100 Hz/s 。
- (6) A/D 转换器 12 位, 单片 CMOS 电路。
- (7) 非线性失真 $\leq 1\%$ 。
- (8) 输入道数 2 道。
- (9) 道间串音 $< -119 \text{ dB}$ 。
- (10) 谐波失真 $\leq 1\%$ 。
- (11) 带宽 0.635 cm , 盘径 12.7 cm ; 带速 $4.75, 9.5, 19 \text{ cm/s}$ 。
- (12) 记录密度 4 轨, 每轨 850 BPI ; 记录格式 改进型归零制。
- (13) 运行方式 定时程序控制间歇式, 可调定时范围 $1 \text{ min--}24 \text{ h}$, 启动间隔 $1 \text{ s--}59 \text{ min } 59 \text{ s}$, 每次记录 $1\text{--}59 \text{ s}$, 可调启动次数 $1\text{--}999$ 次。
- (14) 数字钟 晶振频率 1 MHz , 稳定度 $\pm 3 \times 10^{-7} (0\text{--}40^\circ\text{C})$; 数字脉冲对时误差 $\leq \pm 0.5 \text{ ms}$ 。
- (15) 电源功耗 $\pm 9 \text{ V}, \pm 15 \text{ V}$; 等待 1.1 W , 记录 3.3 W 。
- (16) 工作环境 $0\text{--}40^\circ\text{C}$, 湿度 $\leq 85\%$ 。
- (17) 尺寸重量 $320 \times 230 \times 190 \text{ mm}$, 5.5 kg 。

2. 投放与回收装置

- (1) 工作水深 $\leq 250 \text{ m}$ (水密压力 $\leq 28 \text{ kg/cm}^2$)。
- (2) 下沉力和速度 $14 \text{ kg}, 1.5 \text{ m/s}$ 。
- (3) 投放重量与尺寸 $60 \text{ kg}, 600 \times 450 \times 350 \text{ mm}$ 。
- (4) 上升力和速度 7 kg (总浮力 46 kg), 1.2 m/s 。

(5) 回收重量与尺寸 39 kg, $\phi 320 \times 670$ mm.

3. 释放装置

(1) 双钟控电腐蚀 主钟定时 1 min—24 h; 备用钟定时 1—999 h; 等待功耗 22 mW, 腐蚀耗电 0.13 VAH.

(2) 水声遥控爆炸螺栓 作用距离约 1500 m.

4. 拾震换能器

(1) 地震计 LS-1 型地震计, 阻尼常平架支撑, 允许倾角 55° .

(2) 水听器 通频带 3—150 Hz, 灵敏度 $70 \mu\text{V}/\mu\text{bar}$.

5. HS1 数据回放器

(1) D/A 转换器 12 位, 单片 CMOS 电路.

(2) 同时输出数字和模拟信号.

(3) 自动控制模拟回放记录长度、输出时间脉冲及数字输出的时间窗口.

(4) 与微机配套预处理(打印、绘图、数字滤波、频谱分析).

参 考 文 献

- [1] 中国科学院声学研究所释放器研制组等, 爆炸水声释放器, 海洋仪器, 3, 1—14, 1981.
- [2] William A. Prothero, Jr. A digital event-recording ocean bottom seismometer capsule, *Marine Geophysical Researches*, 3, 119—141, 1977.
- [3] 朱跃芳, 超低速微型数字磁带机, 电子技术, 2, 24—26, 1980.
- [4] 虞浦帆等, 记录方式与读出方法, 数字磁记录与磁盘, 66—89, 科学出版社, 1980.

HS1 DIGITAL OCEAN BOTTOM SEISMOGRAPH

HAO WEI-CHENG XU LI-GUO RAN CHONG-RONG ZHANG YU-YUN CHEN YUE-ZHONG
(Institute of Geophysics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

In this paper the configuration and principle of design of the HS1 are described, and some results of experimental marine observation are given.

The HS1 digital ocean bottom seismograph is developed for deep marine seismic sounding. The design consists of a digital seismometer, launching and recovering devices. The main characteristics which were measured by microcomputer are the following; noise level no more than $0.1 \mu\text{V} \cdot \text{rms}$; dynamic range 119 dB; A/D and D/A both 12 bit; bandwidth 0.2—25 Hz; linearity error less than 1%; harmonic distortion less than 1%; crosstalk less than -119 dB; accuracy of timing 0.01 s; power consumption 1.1 W when waiting and 3.3 W for recording. Both digital and analog signals obtained simultaneously by the system can be easily preprocessed by a microcomputer.