

海底地震仪研制及数据处理

游庆瑜 刘福田 刘劲松

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

1. 研究背景和意义

近年来,被动大陆边缘盆地的陆坡区及深海平原区相继发现了许多大型油气田,其勘探领域已扩展到数千米水深海区。常规的反射地震方法采集的资料中,中深层地震信号微弱,干扰严重,难以满足地质解释的需要。长排列大容量地震勘探成为当前解决深水复杂构造问题的首选技术,其中的 OBS 和 MCS 组合探测技术越来越受到重视。

海底地震仪(OBS)的研制是因上述目的而提出的。中国科学院地质与地球物理研究所参加了由国土资源部广州海洋地质调查局主持的“十五”863计划“深水油气地球物理勘探技术”课题的研究工作,承担了微功耗、大动态、三分量、高频海底地震仪(OBS)的研制及其记录资料的处理解释方法的研究。OBS 及其观测资料的处理和解释技术,不仅为“深水油气地球物理勘探技术”提供高技术支撑,亦将为我国的深水油气勘探寻求新的技术;OBS 在“长排列大容量震源地震采集技术”的海上作业中成功的应用,标志着我国同美国、德国、日本等国成为世界上拥有研发 OBS 能力的少数几个国家。

2. 海底地震仪研制

海底地震仪采用单球一体化结构,即仪器舱和水声通讯设备等全部集中于一个玻璃舱球内。这种结构减轻了系统重量、降低了购置成本、减小了重量和体积,便于海上作业。脱钩装置采用电腐蚀方案,仪器在接收到释放水声指令后向紧固沉耦架的不锈钢丝加电,不锈钢是在3至5分钟内熔断,仪器舱球与沉耦架脱离,仪器舱球上浮。

海底地震仪的测震系统由短周期检波器和数据采集器组成。短周期检波器选用速度型检波器,自振频率 2Hz。检波器谐振频率大于 150 Hz。检波器置于常平架上,采用万向姿控结构,高黏度硅油阻尼。由于采取了较精密的轴承支架和表面处理等措施,能保证当海底倾斜 30°范围以内检波器仍能正常工作。

数据采集部分采用 32 位单片机技术和成熟功能模块,将软件作为整个系统的核心,大大简化了硬件设计,从而提高了仪器的整机性能和工作可靠性,同时使功耗大大降低,实现了微功耗,为单球一体化设计提供了保证。各个 OEM 功能模块在如 GPS 模块、数传模块、电子罗盘模块都是以相同 RS-232 协议与单片机通讯,以多路开关方式实现分时复用。

模数转换器采用 4 阶增量调制器,在输入信号达 1KHz 时仍能达到接近 120dB 的动态范围。数据存储采用固态存储介质(Nand Flash Memory),SM 接口,容量可从 2G 扩展到 8G 或更高。数据存储的可靠性较之传统的硬盘大大提高。

3. 前期试验

前期试验包括室内实验、地震台野外测试和千岛湖试三个阶段。在室内的实验中,我们在水槽内对 OBS 水声通讯、脱钩机构进行了上百次的实验,确保其工作可靠。利用小型振动台对 OBS 的三分量地震计幅频特性进行了反复标定。模拟海底 4 摄氏度环境下对仪器钟差进行了数周的连续监测。

在北京白家疃地震台将 OBS 倾斜 15 度放置于台基上,敲击台基测试对脉冲信号的响应,并与陆上同类地震仪进行比对,测试其耦合特性。此后进行了数周天然地震观测试验。其间记录到了数个爆破和天然地震事件。

我们与广州海洋地质调查局合作,于 2003 年 1 月在千岛湖进行了 OBS 模拟观测试验,湖试震源由广州海洋地质调查局提供。湖试在中科院声学所新安江试验场的千岛湖水域进行。湖试过程中,共有两台 OBS 进行投放回收试验 14 次,全部获得了成功。并清晰地记录到了数公里远单只气枪信号及周边人工爆破信号。

2003 年 3 月,我们搭乘“海洋四号”科学考察船在珠江口海域,共有两台 OBS 进行了四次投放回收试验均获得了成功。

4. 海上数据采集

为了探测南海北部陆缘带壳幔精细结构,2003 年五月我们沿珠江口盆地、东沙群岛呈 NW 向布设了一条横过南海北部陆缘带的地震剖面。沿剖面密集放炮,进行了“长排列大容量震源地震采集技术”的海上

作业,进行MCS和OBS的组合勘探。我们采用气枪作为可控震源,其平均间隔约为100m,放炮时间间隔约为48s,气枪阵容容积为7560Cu.in。我们自行研制的5台OBS以24~37km的间隔排列在230km的研究剖面上,因海流等因素,投放位置与实测位置稍有差别;采集器的采样间隔为8ms。投放后围绕投放点在各个方位进行多次测距。利用测距数据按照震中测定的方法,确定OBS在海底的位置坐标,数据偏差小于10米。气枪激发的位置精度在米量级,时间精度不大于100毫秒。地震仪时钟精度经过内插校正不大于100毫秒。

海上作业的时间为7天,投放作业时海况涌高为1~3m,OBS投放作业能在30分钟内完成。仪器下沉速度平均约为1.5m/s。气枪放炮时拖揽和OBS同时接收信号,测线长度超过300公里。在作业结束后,5台OBS都成功地顺利回收。OBS上浮速度平均约为0.8米。

5. 数据处理

在数据预处理过程中,对原始数据采用了道内均衡、带通频率滤波(5~30Hz)。经预处理后对每台OBS的各道进行初始折射波到时拾取。预处理显示获得的OBS数据的整体质量非常好,共拾取了信噪比高的3775个初始折射波到时。利用Clayton等人的方法对每台OBS数据采用 $t-p$ 变换和 $z-p$ 变换,将数据由时间-偏移域转换为深度-慢度域,得到每台OBS下面的一维速度-深度函数。利用界面起伏和每个OBS下的一维速度-深度函数,可给出整个研究剖面的一维壳幔结构模型。

6. 成像反演方法

采用华标龙和刘福田提出的速度结构和界面联合成像方法。该方法是一种混合的正反演方法,先利用伪弯曲法射线追踪计算理论走时,与OBS观测走时得出走时残差,据此进行速度结构和界面的联合反演,得到二维模型,再将所得二维模型用伪弯曲法射线追踪计算理论走时,与OBS观测走时得出新的走时残差,检查走时残差的均方根误差是否小于给定值,如果不小,则用此走时残差进行新一轮速度结构和界面的联合反演,得出新的二维模型,把它作为新的初始模型,再重新进行正反演计算,如此反复迭代,直至走时残差最小,满足给定的条件。由于同时反演速度参数和界面参数,为了消除两者之间的相互影响,采用刘福田等提出的正交投影算子法分别求解速度参数和界面参数。在整个过程中,采用由浅入深逐层成像的方法,即先对沉积层成像,然后为地壳,最后为上地幔顶层,这样可以降低解的非唯一性。

利用得到的速度结构模型,计算理论走时,并绘制射线路径图,对理论走时和观测走时进行拟合,得到了每台OBS的走时拟合曲线,且其均方根误差小于0.06s。

利用OBS宽角折射数据,通过射线追踪和走时拾取对测线剖面进行速度结构和界面的联合成像,得到一条南海北部陆缘带二维精细壳幔结构。

7. 总结和展望

(1) 主要成果

研制出可用于300-3000m水深海底进行“深水油气地球物理勘探”的低功耗三分量数字海底地震仪(OBS)五套;开发配套的数字海底地震仪(OBS)释放与回收技术。成功地在潮汕海域投放五台海地地震仪接收大功率气枪源的人工地震信号。5台OBS都成功地回收;对大功率气枪在120km炮检距内都有高质量的记录。开发出一套用于OBS记录资料处理与解释的方法与软件,其中二维速度与界面的联合反演方法是我们自己提出和发展的新方法,它在国内外均属创新。我们的OBS具有完全的自主知识产权,发明专利正在申请中,海底数字地震仪专利申请号为200410101868.7。

2005年11月我们和某军工研究所进行合作,利用5台海地地震仪构成的小型台阵检测了舰艇航行时所产生的海底地动信号。实验结果显示海底地震仪具有相当广阔的军事运用前景。

(2) 当前改进工作

我们现已实现了水声通讯模块的国产化,OBS采集通道由原来的3分量速度型,扩展为7通道即3分量速度计、3分量加速度计和1个水声通道。在改进的OBS中,常平机构采用了钛合金材料,根据姿态传感器的信号,利用单片机驱动步进电机,进行姿态调整。保证了常平机构的水平精度。由于不采用硅油阻尼的封闭结构,常平机构体积和重量得以减小,电容换能的宽带地震计也能放入现有的单球OBS中,用于天然地震观测的单球一体化宽频带海底地震仪近期将进行野外试验。

对多分量地震数据进行处理,进而实现多波、多震相、多参数地震成像的探索也在积极开展中。

参 考 文 献

1. 游庆瑜,刘福田,冉崇荣等.地球物理学进展,2003,18(1):173~176
2. 华标龙,刘福田.地球物理学报,1995,38(6):750~756
3. 刘福田.地球物理学报,1984,27(2):167~175