

国家863计划资助

海洋浅地层高分辨率 多道地震探测技术及应用

*HAIYANG QIANDICENG GAOFENBIANLÜ DUODAO
DIZHEN TANCE JISHU JI YINGYONG*

王揆洋 黄逸凡 连艳红 张心彬 著

国家863计划资助

海洋浅地层高分辨率 多道地震探测技术及应用

王揆洋 黄逸凡 连艳红 张心彬 著

海洋出版社

2011年·北京

图书在版编目(CIP)数据

海洋浅地层高分辨率多道地震探测技术及应用 / 王
揆洋等著. —北京: 海洋出版社, 2011.8

ISBN 978-7-5027-8099-9

I. ①海… II. ①王… III. ①海洋—地震观测—技术
IV. ①P315.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第181227号

责任编辑: 项 翔
责任印制: 刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

北京画中画印刷有限公司印刷

2011年8月第1版 2011年8月北京第1次印刷

开本: 889mm×1194mm 1/16 印张: 10.25

字数: 248千字

定价: 150.00元

发行部: 62147016 邮购部: 68038093 专著图书中心: 62113110

海洋版图书印、装错误可随时退换

前言

海洋高分辨率浅地层多道地震探测技术是一门正在发展的学科，是地球物理勘探方法中地震勘探的一个重要分支。将多道地震探测方法替代单道探测方法，进行海洋浅地层调查，近年来得到了迅猛的发展，取得了良好的效果。本技术的目的是探测目前位于海水之下晚更新世以来（距今10万年）形成的地层，确定它们的岩相、厚度、结构和分布及地层界面和基岩的空间展布，判断浅层气、活动断层等灾害地质存在与否，为海洋石油钻探和海域工程建设提供技术支撑和服务，并推动第四纪地质科学（古环境、古气候、古海平面等）的研究。

在国家“863”计划的支持下，“十五”期间，“近海工程高分辨率多道浅地层探测技术”（2003AA602250）课题开始了高分辨率浅地层多道地震探测技术的研究工作，在24通道信号采集及实时DSP处理技术、高灵敏度宽频多道模拟接收电缆研制、震源激发技术和高分辨率后处理软件开发等方面取得了突破，研发了我国第一套完全具有自主知识产权的低发射能量的高分辨率多道浅地层探测系统，适合于5~80 m近海环境，穿透深度为海底之下120 m，经过处理后的地震记录剖面最高分辨率达到0.3 m。“十一五”期间，“深水高分辨率浅地层探测技术”（2006AA09A108）课题继续了前期课题的研究工作，旨在为南海深水区的工程地质探测工作提供服务。课题开展了高能固体复合开关重复脉冲电源、高采样率高速数字传输及记录等技术的研发工作，将震源发射能量从500 J提高到10 000 J，模拟传输技术升级为数字传输技术。课题研发了120道高分辨率数字地震采集仪、120道数字地震采集缆和10 000 J等离子体震源，适合50~3 000 m水深工作，海底之下的穿透深度最大可达400 m，分辨率在1 m左右，根据需要系统可进行扩展，自此形成了一套从浅水到深水的高分辨率多道地震探测系统。课题组在研发过程中，始终坚持边研发、边试验、边为国民经济建设提供服务的指导思想，及时地将科研成果转化为生产力，相关技术在港珠澳大桥、南海油气田等数十个国家重大建设项目中发挥了作用，提供了服务。

本书对上述成果所涉及的技术进行了系统的总结,全书共分5章。第1章对海洋浅地层高分辨率多道地震探测技术的概念、面临的问题及困难进行了系统的总结和介绍。第2章简单总结了震源技术,重点对高 P/B 值等离子体震源所涉及的基本原理进行了总结,对震源的基本结构、性能进行了介绍。第3章介绍了高采样率(10 kHz)、大动态(114 dB)、高传速(147 M)、长记录(2 s以上)的采集与记录设备所涉及的硬、软件技术进行了介绍。第4章参考并总结了前人研发的技术,将主要用于石油勘探的处理低频多道发射波的常规处理方法,移植到海洋浅地层高分辨率多道数据的处理上,并针对高分辨率反射波的特点开发了相关软件,提高了动校正后叠加的信噪比,在试验和应用中取得了很好的探测效果。第5章向读者展示了近年来海洋浅地层高分辨率多道地震探测技术在跨海大桥、海底隧道、近海核电厂等海洋工程中的典型应用实例。至于多道地震勘探的常规原理和方法,本书不进行罗列与重复介绍。

本书第1章由裴彦良、王揆洋编写,第2章由闫克平、王荣华、黄逸凡编写,第3章由连艳红、张在陆、雷斌、豆会平编写,第4章由张心彬、孟庆生、王揆洋编写,第5章由王揆洋、华清峰编写。

著者总结并吸收了前人及课题组的大量工作,理论及研究能力有了极大的提高,但不足之处仍在克服之中,著者期待相关技术取得进一步的发展和提高。

2011年5月

Content 目录

第1章 海洋浅地层高分辨率多道地震探测技术简介1

1.1 地震勘探的分辨率及其分类	2
1.2 海洋高分辨率地震勘探的发展	3
1.3 海洋高分辨率地震勘探的研究对象	4
1.4 影响浅地层探测质量的几个问题	4
1.4.1 海上施工	4
1.4.2 导航定位问题	5
1.4.3 发射能量	5
1.4.4 声波的采集	6
1.4.5 数据的传输及记录问题	6
1.5 解决问题方案	7

第2章 等离子体震源技术 8

2.1 前言	9
2.2 基本原理	12
2.2.1 脉冲电容器充放电原理	12
2.2.2 水中脉冲电晕放电原理	15
2.2.3 气泡脉动与声辐射原理	19
2.3 震源基本结构	25
2.3.1 主要参数及指标	26
2.3.2 脉冲电源	26
2.3.3 多电极发射阵	31

第3章 采集、记录技术32

3.1 概述	33
3.2 设计原理	35
3.2.1 压电水听器	36
3.2.2 前置放大电路	38
3.2.3 $\Delta-\Sigma$ A/D模数转换	39
3.2.4 系统性能指标评估	43
3.2.5 高速数传链	48
3.2.6 数据传输模式	49

3.3 多道高分辨率数字地震拖缆	51
3.3.1 水下系统	52
3.3.2 室内系统	65
3.4 多道中央记录系统	76
3.4.1 总体结构	76
3.4.2 软件视图设计	79
3.4.3 软件功能分配	80
3.4.4 模块设计	85
3.4.5 用户界面设计	88
3.4.6 关键问题分析	89

第4章 海洋浅地层高分辨率多道数据处理技术 91

4.1 速度分析	92
4.1.1 协方差度量法	93
4.1.2 统计相位相关法	94
4.2 多次波压制技术	97
4.2.1 预测反褶积技术	97
4.2.2 K-L变换	99
4.2.3 预测模型减去法	104
4.3 涌浪校正	106
4.3.1 炮集域涌浪校正	106
4.3.2 叠后剖面涌浪校正	107
4.3.3 涌浪校正前后叠加剖面的对比	107
4.4 去噪处理	108
4.4.1 Gabor反褶积	108
4.4.2 反Q滤波	108
4.4.3 多项式拟合	109
4.4.4 小波变换分频补偿	110

第5章 高分辨率勘探技术在工程地质勘探中的应用实例 113

第1章

海洋浅地层高分辨率 多道地震探测技术简介

- 1.1 地震勘探的分辨率及其分类
- 1.2 海洋高分辨率地震勘探的发展
- 1.3 海洋高分辨率地震勘探的研究对象
- 1.4 影响浅地层探测质量的几个问题
- 1.5 解决问题方案

海洋浅地层高分辨率地震探测的探测目标通常是揭示海底之下几十至数百米深、保存良好、成岩化差、未受到强构造运动作用的中、晚更新世以来形成的沉积地层。20世纪80—90年代,考虑到工作效率和施工便利,在海上多采用拖曳式工作方法,单点激发声波和单道接收反射波。由于发射的地震子波频率较高,探测的地层厚度在几十至200 m之间。与石油地震勘探相比,穿透率根本无法比较,但分辨率又是石油地震勘探难以相提并论的,通常将其简称为浅剖探测,从探测的目标和要解决的地质问题来看,又称为工程地质地震勘探。鉴于当时的技术水平,获取的地震剖面质量始终存在不稳定的现象。进入21世纪以来,海洋高分辨率地震探测技术飞速发展,多道技术开始运用于高分辨率地层探测。本书总结了国家“863计划”(2003AA602250)和(2006AA09A108)课题的研究内容,向从事海洋工程地震勘探与研究的科技工作者介绍近十年在海洋领域高分辨率浅地层探测技术的进展及成果。

1.1 地震勘探的分辨率及其分类

分辨率是地震勘探的生命线,通常指在时间剖面上垂直方向识别最薄地层的能力,即能识别的接收到的地震波,根据Widess典型模型^[1],地震探测的垂向一般在子波波长的 $1/4 \sim 1/8$,简单的估算方法认为是地震子波波长的 $1/4$,用时间或厚度单位表示,是地震勘探设计、使用仪器和仪器的质量、野外作业质量(包括工作环境)及资料处理的综合反映。在地震勘探设计时,根据任务的要求,确定使用的仪器和作业方式,工作正常时,分辨率也就基本确定。

海洋地震勘探分辨率的高与低如何界定或分类,目前国外科技人员已取得共识。2000年“休斯顿国际近海技术会议”和2004年“欧洲地球物理学联合会年会”上,法国海洋开发研究院J. C. Sibuet、P. Farcy等提交的有关海洋地震探测及远景的报告中^{[2][3]},按识别目标的深度和尺度(图1-1)、穿透深度和垂直分辨率与子波频率的关系(图1-2)、各种震源的频率(图1-3)对传统地震、高分辨率地震和甚高分辨率地震进行了分类,高分辨率地震波的频率在几百赫兹的范围内,穿透深度在几百米,震源以传统电火花为代表,在下一章将介绍21世纪开发的等离子体震源,它的主频在1 kHz左右,穿透地层厚度在200 m左右,属于甚高分辨率地震范畴,按习惯说法,仍将其称为高分辨率地震。

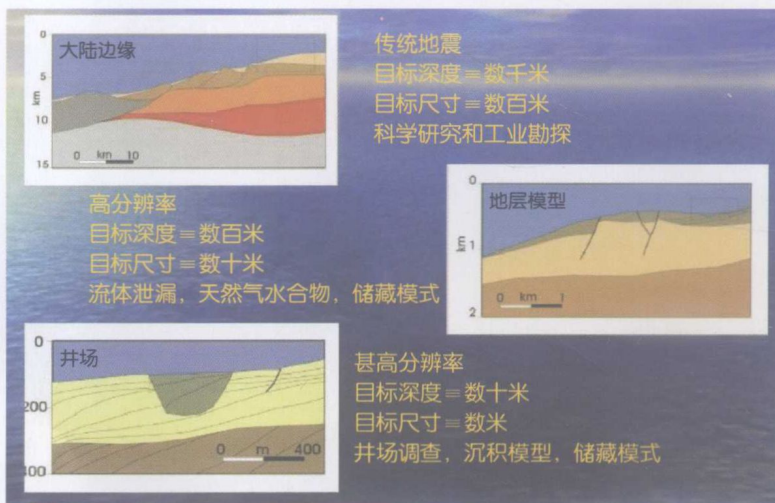


图1-1 按识别目标的深度和尺度对于地震分辨率的划分(P. Farcy, et al., 2004)

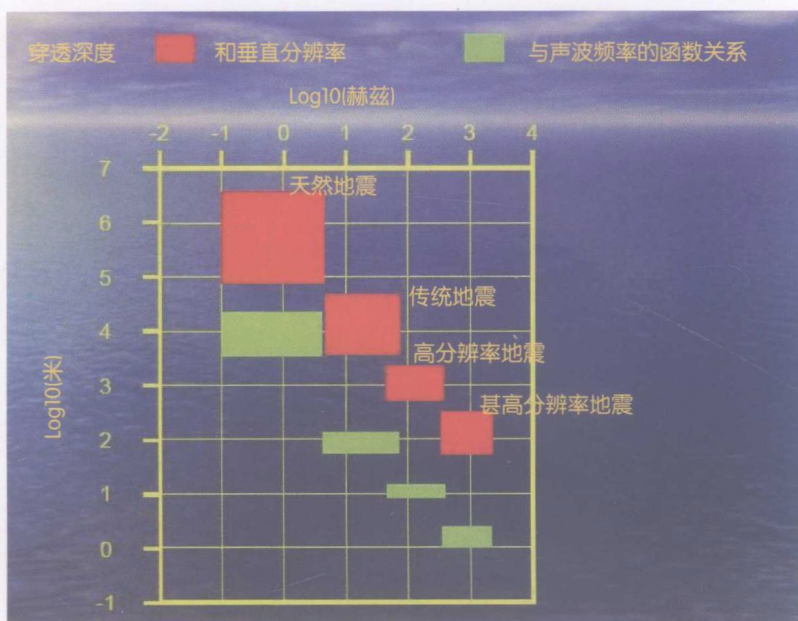


图1-2 按穿透深度和垂直分辨率与子波频率的关系划分 (P. Farcy, et al., 2004)

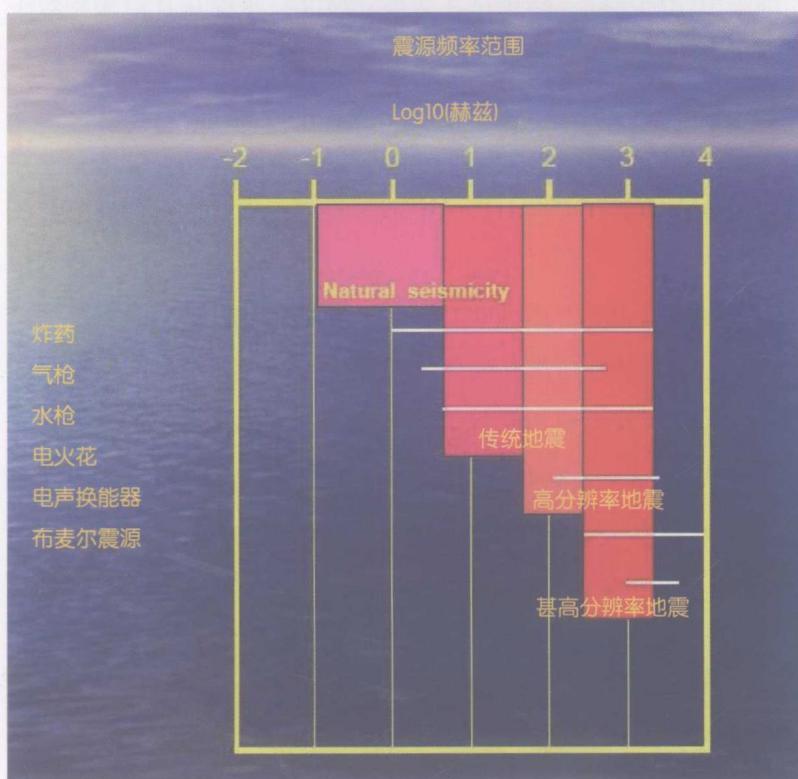


图1-3 各种震源的频率与分辨率分类 (P. Farcy, et al., 2004)

1.2 海洋高分辨率地震勘探的发展

为了获取高分辨率地震剖面, 自20世纪90年代地震数字记录与实时剖面显示技术引进微机后, 取得了飞跃的发展。21世纪开发的窄脉冲、高重复性震源、大动态采集记录系统和小道距宽频模拟或数字24~96道接收缆及相应的数据处理技术, 使得高分辨率地震探测工作提高到一个新的层面, 在浩瀚的大海之下埋藏数十万年的沉积地层向人们展示了它的新面貌, 增加了新的研究内容。

1.3 海洋高分辨率地震勘探的研究对象

海洋高分辨率地震勘探的主要研究对象是在海洋环境中经过漫长地质历史形成的沉积地层,获取的是这些地层的声学特征,地层的划分是按声学特点进行的。由于方法和设备能力所限,所揭示地层多为距今10多万年以来的晚第四纪沉积地层,陆源和海源的物质在相对稳定、构造活动弱或无大规模造山运动的环境中沉积形成了这些地史中最年轻的地层,具有松软、成岩性差和成层性好的特点,同样由于长期浸泡于水中 and 成岩差的原因,声波在其中传播的速度差异较小,给多道叠加消除多次波带来了困难。晚第四纪以来,全球发生了多次重大的冰期与间冰期事件,海平面发生了频繁的升降变化,形成了海退、海进事件,晚第四纪沉积地层将上述事件完整地保存了下来,海洋高分辨率地震勘探对于这些地层的探测将揭示各晚第四纪沉积地层形成时的古海洋、古气候及新构造运动,在近海地区,这些地层沉积厚度较小,沉积基底或基岩的产状能够得到充分揭示。

我国近岸及陆架海区,由于幅员辽阔,沉积物源丰富,晚第四纪以来,沉积了一套海、陆相互沉积的地层层序,具有丰富多彩的地震声学相特征,特别是在南海陆坡区,水深从几百米到数千米变化,为沉积地层的生成及演化提供了纵横驰骋的环境,保存了完整的沉积地层序列。海洋高分辨率地震勘探通过获取的反射波的波形、相位、终止类型,确定波阻抗界面的强弱(沉积物变化及环境事件),分析地层层理及产状(水平、平行、波状、交错层理等及沉积环境),判读地层接触关系(进积与退积,上超、下超、顶超、底超等),可进一步确定地层的沉积相,推测地层形成年代、断层及其活动性演化。

迄今为止,采用较小检波器间距(0.2 cm)和道间距(3.125 m)的高分辨率多道地震探测系统在我国近海已经得到了广泛的运用,发射能量从几百焦耳提高到数千焦耳,接收技术从模拟走向数字,调查区域从浅水走向深水,在探测深度、分辨率和资料质量稳定性方面都有了前所未有的效果。这套技术在港口、桥梁、隧道、核电环境工程调查中,取得了良好的效果,为海洋工程建设提供了服务。水下不同特性沉积层的厚度与分布特征,水下浅层地质灾害的识别、圈定与评估,如埋藏古河道、浅层气以及活动构造等,为第四纪地质科学的发展提供了新素材和基础。

1.4 影响浅地层探测质量的几个问题

1.4.1 海上施工

海上施工,要使用船舶,必须满足相关规定和要求,首先必须能够确保人员及设备安全及供需,在调查区内,能够克服各种海洋环境,确保完成任务。

调查船应想方设法,降低自身产生的电磁及噪声,避免串音。施工时,应保持匀速直线航行,不宜采用自动导航技术,操船人员在确保安全的情况下,慎重调整航向,频繁调整航向以图按设计测线航行,往往会产生无法处理的噪声。

由于水中发射与接收设施均位于船后,所以采用航行时边放炮边接收的工作方式及观察系统,具有极高的工作效率。

1.4.2 导航定位问题

调查船的航行和多道地震记录系统的等距触发和采集都要用到导航定位系统,所以导航定位系统也是影响浅层地震勘探质量的一个因素。由于GPS单机定位精度只能达到约 $\pm 20\text{ m}$ 左右,不能满足工程测量精密定位的要求,目前的定位系统均采用差分定位系统。对于近海海洋地震勘探,可以使用信标差分或星基差分定位设备。如果地震测线远端距岸超过 300 km ,则只能使用星基差分定位设备。信标差分定位精度为米级,而星基差分定位精度可达分米级。根据实际海上作业经验,不论物美价廉的信标差分定位设备还是昂贵的星基差分定位设备,都可能出现畸变点、信号无差分、设备死机等现象或故障。这些情况不作实时处理会影响地震勘探质量,严重时可能导致多道地震设备死机或烧毁,也可能导致采集的地震资料报废。

海洋地震勘探中震源的激发可以分为定时激发和定距激发。由于船速的变化,定时激发不能保证两炮之间的实际航向距离完全一致,从而导致多道资料叠加时分辨率的降低。因此,在多道地震勘探中一般采用定距激发。定距激发由地震数据记录软件实现(也可采用定位导航软件实现),软件采集导航定位设备输出的导航信息,实时确定下一炮的激发时间。为了避免上述由于导航定位设备出现数据畸变点及定位误差影响地震勘探质量,软件在设计上要考虑使用诸如最小二乘法等方法对调查船航迹进行曲线拟合,尽量减弱这些误差的影响,实现等距放炮,其基本依据就是水中移动的船体在无外力作用下,保持惯性运动,即使在驱动力发生变化的情况下,运动姿态也是逐步变化进行调整的。

1.4.3 发射能量

发射能量与工作效果有着非常复杂的关系。通常人们认为发射能量大,穿透深度也大,因而喜欢选择较大的发射能量,用通俗话说,越响越好,但是能量增大,由于在水中发生声能转换,形成的子声波由于水质点的运动,其波形无法避免地变宽并复杂化,接收的反射波的分辨率自然降低;如果从发射子波的频谱分析,假如仍在高分辨率的范畴中,这种能量在地层中衰减很快,能量增大,对穿透深度的提高生效有限;大能量的发射,也对仪器提出了更严苛的要求,同时也不可避免地受到多种因素限制。

对于发射声波的波形,要求是一个干净的、无后续余波的子波,这是确保高分辨率地震的关键,只要接收的反射波有足够的信噪比,就能确保取得良好的工作效果。

海上施工时,放炮间隔通常在 1 s 左右,对于震源设备提出了严苛的要求,要求快速存储能量,也同时要求快速释放能量,并将其转换为声波。实现高分辨率探测,要求声波的主频在几百到 1 kHz 左右。20世纪90年代开发的仪器难以做到按施工设计要求的能量在较短的时间内恒定储能并且在水中干净释放。由于发射声波的频率较高,难以实现较大的发射能量,虽然有些设备的设计最大能量也能达到较高的水平,但无法避免发射声波的频率的降低,并且需要一定时间进行储能,因而放炮间隔也不得不增大。

1.4.4 声波的采集

反射波的接收通常采取装有检波器的电缆，或者直接使用换能器。换能器由于接收面较小，受调查船在水中的姿态影响，或者直接说，受海洋环境及其本身的尺度影响，接收的能量难以做到恒定，直接影响了剖面的质量。

拖曳电缆（streamer）通常安装了多个检波器，按要求进行组合，检波器的频宽在2~10 kHz，10 kHz压电陶瓷管检波器最佳，实现单道接收反射波。同样海洋环境（波浪、海流、气象）、调查船的航行状态的变化，都直接影响了电缆对声波的接收状态及其变化，降低了剖面的质量。

来自海底之下的反射波到达海面之后重新返回，会造成接收设施的二次接收，海水-空气界面由于空气的密度远低于海水，因而是一个软界面，反射波的波形相对于入射波完全反转，有人将其称为虚反射，因此要求接收设施位于水面之下反射波1/4波长处。接收设备的比重及航行速度的不适合及变化，虚反射会对高分辨率探测造成严重恶果（图1-4），海上施工人员往往忽视这个问题，室内回放时资料无法处理与解释，或采取强行解释的办法。

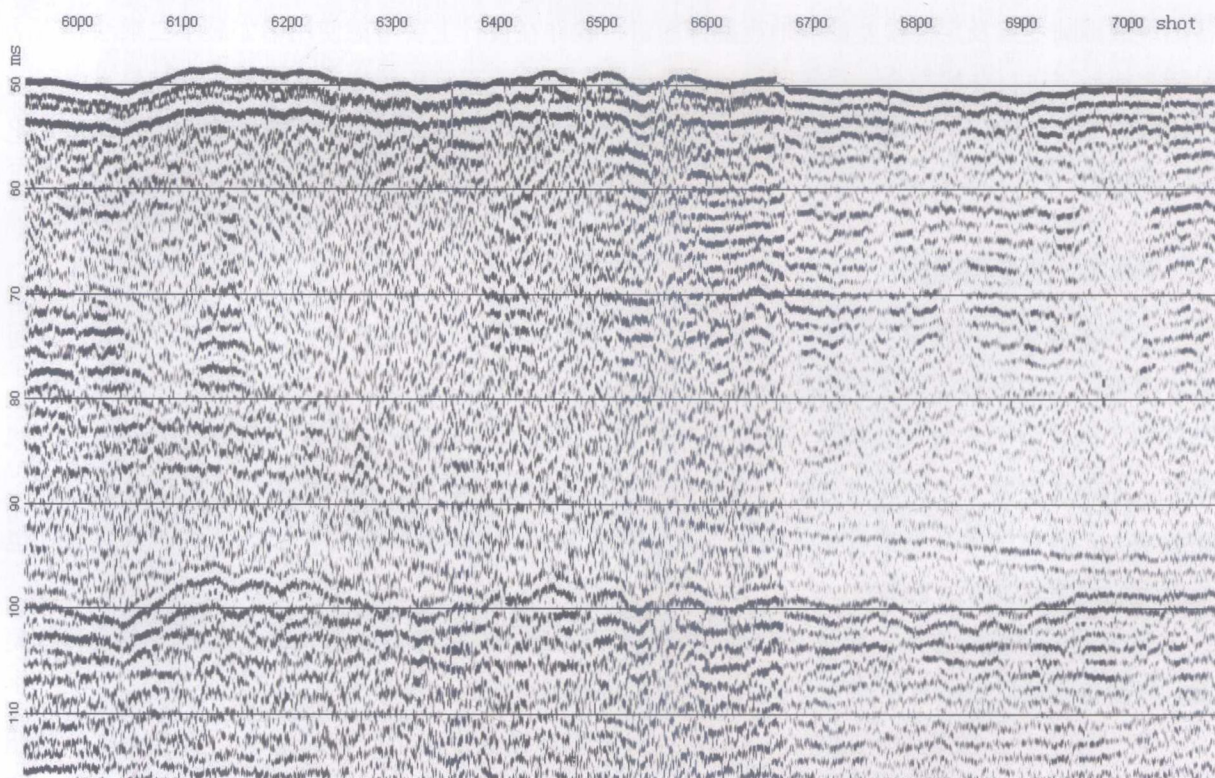


图1-4 图左为虚反射，图右为实时解决问题后的剖面

1.4.5 数据的传输及记录问题

海洋浅层勘探系统与深层石油地震勘探系统的区别是采样率高、炮间隔短、数据记录长度短，这就要求系统具有实时性强、灵敏度高、传输速率高等特点，浅层勘探仪采样率最高要达到16 K，炮间隔至少要1 s，记录长度达到600 ms，这就要求数据传输率达到60 M。数字拖缆工作时，来自震源的高压大电流干扰和空间电磁干扰，将对长距离高速数据传输带来严重影响，将导

致数据传输的丢码和误码现象, 稳定可靠的数据传输是保证系统精度的重要保证, 是系统设计的一大难点。

同样由于数据量巨大、炮间距短, 系统需要实时完成采集、传输、存盘、显示、质量控制等, 在系统控制上必须合理利用资源, 以确保系统稳定、可靠地工作。

1.5 解决问题方案

上述问题直接引起最终剖面上反射波波形、相位变化较大, 难以进行同相位追踪, 给解释人员造成极大麻烦。

从发射声波着手, 要求震源在极快的时间内恒定储存要求的能量, 并按要求快速干净释放能量, 提供一个频率稳定、无后续余波的发射子波。

从采集着手, 使用多道接收替代单道接收技术, 施工难度增加不大。

从数据传输着手, 设计时采用自定义网路底层AX5802、LVDS等多种数据传输方式, 同轴电缆、标准双屏蔽6类双绞网线和标准6类双绞网线配合使用, 在考虑成本和功效的同时, 采用高性价比的材料, 完成300 m、100 m、50 m不同间距的数据传输, 在设计系统主机的控制记录时, 采用双主机系统, 并采用多线程机制, 并利用CPU绑定机制; 与此同时, 利用内存映射技术、环形缓存技术, 提高数据记磁盘的速度, 解决海量数据的实时记盘、显示及质量监控。

从导航定位实时处理着手, 实现等道距放炮。

从处理着手, 要求解决涌浪和多次波, 进一步提高叠加后的信噪比。

参考文献:

[1] M B Widess. How thin is a thin bed. Geophysics, 1973, 38(6): 1176-1180.

[2] J C Sibuet, H D Needham. Marine Seismic Investigations: A Perspective from France and Europe^① at the 2000 Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, 2000^②.

[3] P Farcy, B Marsset, H Nouze. IFREMER. EGU - Nice, France, April 2004^③.

注:

①Marine Seismic Investigations: A Perspective from France and Europe 法国与欧洲海洋地震调查远景 (报告名)

②the 2000 Offshore Technology Conference held in Houston, Texas. 2000 2000年德克萨斯休斯顿举行的2000年近海技术会议

③EGU-Nice, France, 2004 2004年法国尼斯欧洲地球物理学联合会年会

2

第2章 等离子体震源技术

- 2.1 前言
- 2.2 基本原理
- 2.3 震源基本结构

2.1 前言

人工震源, 简称震源, 用于产生强脉冲压力波, 是陆地或者海洋地震勘探的必备设备。早期利用TNT等烈性炸药作为爆炸源来进行海洋地震勘探, 由于TNT的不安全性和不稳定性, 20世纪50年代末期, 爆炸源逐步被其他震源系统取代, 如电火花、气枪、水枪、套筒枪等(图2-1)。

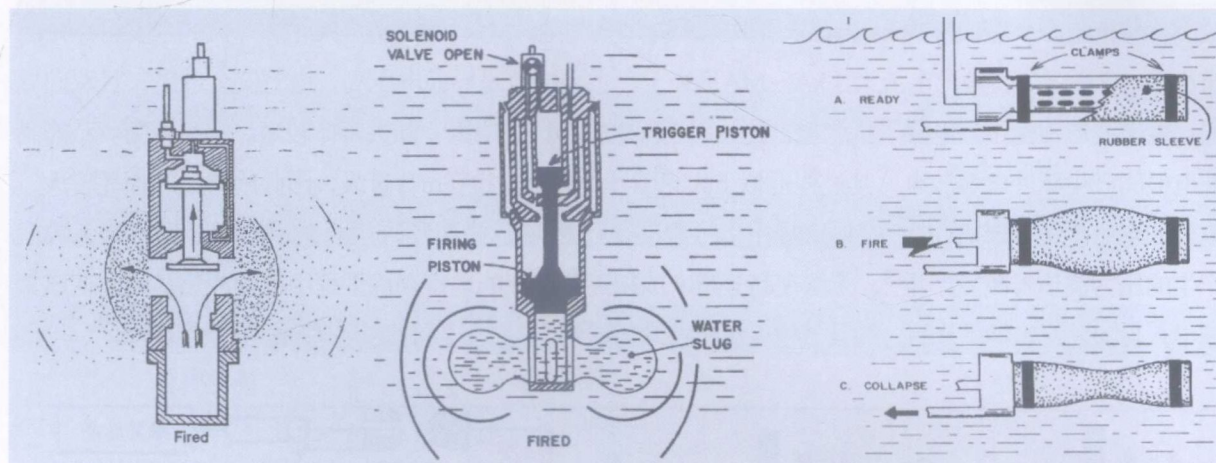


图2-1 气枪(左)、水枪(中)和套筒枪(右)^[1]

电火花震源是最早的爆炸声源替代产品, 属于电声转化装置。它是将电能快速储存, 再按要求快速释放转化为声能。转换方式有两种: 一是通过其他装置将电能转换为机械能, 在水中再转换为声能, 代表为压电陶瓷换能器或BOOMER, 这种转换方式获得的声波, 具有频率高和波形稳定的特点, 缺点是转换能量仅几百焦耳, 无法做大。另一种方式是直接将电能完整干净、快速无振荡地释放于水中, 实现声能转换, 获取最大转换效率。

电火花震源是将电能储存在电容器中, 并通过大功率开关在水中进行高压脉冲放电, 放电产生的机械效应产生声辐射。由于高压脉冲放电输出的瞬时峰值功率高, 可达到MW级, 因此产生的压力波幅值大, 源级高。

1955年, 前苏联科学家Yutkin首先将水中高压脉冲放电的机械效应产生声辐射的过程命名为“液电效应”^[2]。1956年Knott和Hersey通过简单的电容储能向水中电极放电, 产生脉冲压力波可以穿透海底数百米地层, 同时通过拖曳形式得到了连续的地层剖面。1957年, Alpine Geophysical开发了第一套电火花震源系统(图2-2)。此后的数十年电火花震源发展迅猛, 先后有EG&G、Fairfield、Aquatronics等公司开发不同能量等级的系统。如EG&G的230系列, 其能量等级为1 kJ~8 kJ(图2-3)。在国内, 中科院电工所自20世纪70年开始研制陆地使用的电火花震源系统, 部分产品已经在油田作业中使用。

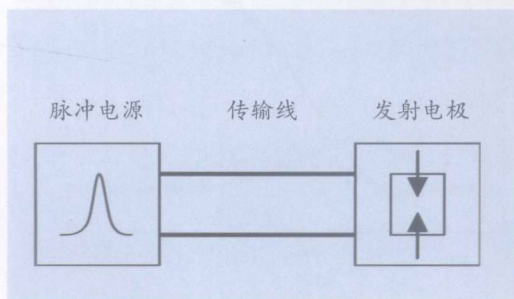


图2-2 电火花震源系统构成

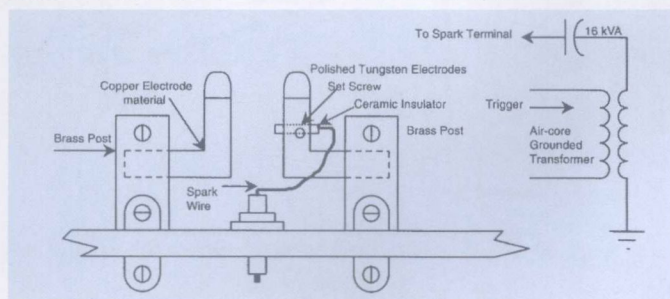


图2-3 EG&G电火花震源系统^[3]

对电火花震源系统进行解构,可以发现一般由脉冲电源、传输线和发射电极三部分构成。脉冲电源产生的高压脉冲经过传输线达到发射电极并引发水下的高压脉冲放电。从放电形式上区分,水中高压脉冲放电又可分为脉冲电弧放电(Pulsed Arc Discharge)和脉冲电晕放电(Pulsed Corona Discharge)。

传统的电火花系统主要采用脉冲电弧放电的形式(图2-4(左))。脉冲电弧放电的工作电压等级较高,峰值电压一般大于10 kV,且主开关采用的是火花隙开关(图2-5)。火花隙开关的主要特点是阻抗小($\text{m}\Omega$ 量级),输出电流大($\text{kA} \sim \text{MA}$ 量级),主要缺点是导通电压高,电气安全性差,且双向导通,输出波形不稳定,电磁干扰严重,此外由于主电极烧蚀的原因,开关寿命较短。同时作为负载的高低电极间产生脉冲电弧放电,其过程近似于火花隙开关,阻抗也在 $\text{m}\Omega$ 量级,因此线路上的损耗较大,电极的寿命也短。EG&G的产品明确提出运行数小时后更换电极的要求。由于多种原因,脉冲电弧放电产生的压力波信号畸变严重^[3],无法在高分辨率或超高分辨率的地震勘探工程中得到应用。因此在该领域中,自20世纪70年代开始,随着气枪、水枪技术的成熟,电火花震源逐步被气枪和水枪取代。



图2-4 脉冲电弧放电(左)和脉冲电晕放电(右)

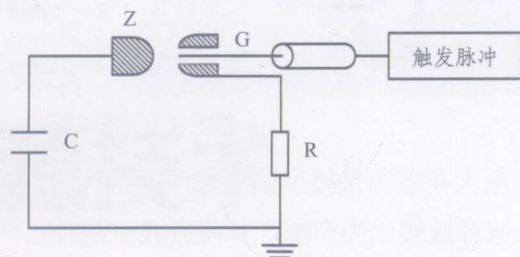


图2-5 三极火花隙开关^[4]

自20世纪90年代,基于大功率半导体开关器件和多电极发射阵技术的成功研发解决了传统电火花震源在实际工程应用中存在的缺陷,主要体现在解决开关和放电电极的寿命问题,并由此开发出新一代电火花震源设备。

新一代电火花震源采用脉冲电晕放电(图2-4(右))。根据图2-4,产生脉冲电弧放电需要高低压电极的间距较小,极间场强大。而脉冲电晕放电的高低压电极间距较大,极间场强较小,其区别于脉冲电弧放电的主要特点是无电弧通道。放电现象只发生在电势梯度较大的电极尖端,其负载阻抗相对较大(Ω 量级),放电电流相对较小。两者典型的电压电流波形比较如图2-6所示。

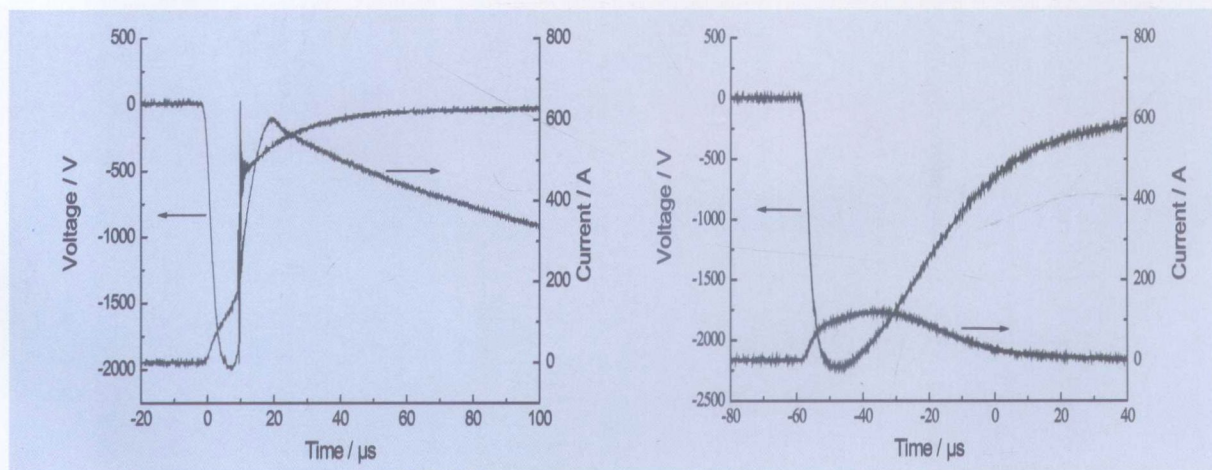


图2-6 脉冲电弧放电(左)和脉冲电晕放电(右)的电压电流波形比较(负极性)