

滩浅海地震勘探 关键技术及其应用

陈浩林 张保庆 叶苑权 刘 军 倪成洲 刘原英 等编著



石油工业出版社

滩浅海地震勘探关键技术及其应用

陈浩林 张保庆 叶苑权 刘 军 倪成洲 刘原英 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从滩浅海地区地震勘探特点出发,以滩浅海地区地震勘探关键技术为主线,简要介绍了国内滩浅海地震勘探技术和装备的发展历程,重点阐述了滩浅海地震资料采集、处理关键技术,并有侧重地列举了两个勘探实例,最后对滩浅海地震勘探技术的发展方向进行了展望。

本书可供从事地震勘探的技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

滩浅海地震勘探关键技术及其应用/陈浩林等编著.

北京:石油工业出版社,2014.9

ISBN 978-7-5183-0208-6

I. 滩…

II. 陈…

III. 浅海海滩-地震勘探-研究

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 119503 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523533 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:9.5

字数:240 千字

定价:90.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序 言

滩浅海地震勘探是一项复杂的系统工程，其难点在于滩浅海特殊的地表条件。从陆地到滩涂（潮间带），再到海上，地表条件变化大，给地震勘探（尤其是地震资料采集）带来巨大的困难和挑战。与陆地、深海地震勘探相比，滩浅海地震勘探从采集方法设计、适用装备选择、技术方法应用到后续资料处理，具有其明显的特殊性。

大港物探经过 40 多年来几代人的探索和实践，特别是近 10 年来，在东方地球物理勘探有限责任公司的大力支持下，滩浅海地震勘探核心技术和装备得到快速发展，形成了滩浅海地震勘探配套技术、方法和适用装备系列，成为公司 PAI 技术系列的重要组成部分，并相继在国内的渤海湾、南海，国外的波斯湾、中亚、东南亚、非洲等地区的滩浅海油气勘探中取得了良好的应用效果。

本书作者从滩浅海地震勘探特点、难点出发，围绕滩浅海地震勘探关键技术，系统总结了滩浅海地震采集设计技术、OBC 导航定位技术、检波点二次定位技术、气枪阵列设计技术和质量控制技术等滩浅海地震勘探采集关键技术，以及噪声衰减技术、一致性处理技术、海底电缆多分量处理技术等滩浅海地震资料处理关键技术。最后，根据地震勘探技术发展的总体趋势，展望了滩浅海地震勘探技术的发展方向。

本书作者没有对滩浅海地震勘探所有阶段和工作环节所涉及的技术进行面面俱到的流程式描述，而是紧紧围绕滩浅海地震勘探核心的关键技术点，针对问题给出解决思路和解决方案，重点突出，实用性强，既是对滩浅海地震勘探关键技术成果的系统总结，也是经验方法的沉淀。我相信，本书对于从事或即将从事滩浅海地震勘探的技术人员、技术管理人员、勘探项目管理人员有非常好的参考和借鉴作用。


2014, 5, 1

前 言

国际上各国对“浅海”或“深海”的分类是不同的。按我国的现行标准,一般把小于 500m 水深的区域称为“浅海区”,大于 500m 水深的区域称为“深海区”。根据我国海洋油气工业的行业标准,水深小于 300m 海域的油气资源定义为浅水油气,水深超过 300m 海域的油气资源定义为深水油气,水深超过 1500m 海域的油气资源定义为超深水油气。油气地震勘探按地表类型大体划分为陆地和海上两大类。在国际上没有将滩浅海从陆地与海上细分出来。因此,本书没有从水深上严格区分浅海与深海,所涉及的浅海是指采用海底地震采集接收系统(包括海底电缆或海底节点)进行勘探的海上部分。

滩浅海地区包括浅海、潮间带、滩涂,以及与之相接的陆地(城镇、水网、沙漠、山地等),地表条件复杂多变。该类地区地震勘探所应用的技术装备既同时具有陆地、海上地震勘探技术装备的特点,又有其特殊性。单纯的陆地地震勘探技术装备或单纯的海上地震勘探技术装备均不能解决滩浅海地区地震勘探问题。因此,在滩浅海地区地震勘探采集过程中,需要根据地表条件变化设计综合解决方案,从装备技术上系统解决激发、接收问题,气枪震源激发、海底电缆放缆(海底节点布设)导航问题,海底检波点定位问题,综合质量控制问题。在地震资料处理过程中,需要重点解决由于近地表条件变化、不同类型震源激发、不同类型检波器接收等因素引起的地震资料属性变化问题,以及复杂作业环境带来的噪声衰减、一致性处理等问题。

本书从滩浅海地区地震勘探特点出发,以滩浅海地区地震勘探关键技术为主线,简要介绍了国内滩浅海地震勘探技术和装备发展历程,重点阐述了滩浅海地震资料采集关键技术、滩浅海地震资料处理关键技术,并各有侧重地列举了两个勘探实例,最后对滩浅海地震勘探技术发展方向进行了展望。

本书是对大港物探多年来滩浅海地震勘探技术发展主要成果的总结与沉淀,期望本书能够为从事或即将从事滩浅海地震勘探的技术人员、技术管理人员、勘探项目管理人员提供有益的参考和帮助,同时期望本书能够为未来滩浅海地震勘探技术的发展提供一些有益的启示与借鉴。

本书由陈浩林提出思路并组织编写,共分 5 章。前言、第 1 章、第 5 章由

刘军编写；第2章由叶苑权负责，陈浩林、倪成洲、秦学彬、王厚常、李德松、韩学义、李海军、郭毅、牛金福、刘仁武、曹建明、白玉山、李晓东、丁冠东、曹明强、牛宏轩、宫同举、袁学东、张莎、史旭等参与编写；第3章由张保庆负责，郭建卿、曾天玖等参与编写；第4章由张洪军负责，袁学东、牛宏轩等参与编写。全书由叶苑权、张保庆、刘原英、苏庆莹统稿，曹孟起、李国发、王梅生审查，陈浩林定稿。

本书的编写得到了东方地球物理勘探有限责任公司郝会民、张少华、刘威北、蔡为芳、王卫华，东方地球物理勘探有限责任公司科技信息处周长征、朱光，东方地球物理勘探有限责任公司市场开发处吴凤山，东方地球物理勘探有限责任公司大港物探处付满清、王长春，东方地球物理勘探有限责任公司装备服务处孙绍斌、易昌华，东方地球物理勘探有限责任公司研究院大港分院常德双、曾友爱，东方地球物理勘探有限责任公司国际勘探事业部刘海波、全海燕等领导和专家的大力支持与帮助，在此表示衷心的感谢。同时，也感谢老一辈滩浅海从业者所做的技术积淀与贡献。

限于笔者水平，书中一定存在不足之处，欢迎读者批评指正。

目 录

1 滩浅海地震勘探概述	(1)
1.1 滩浅海地震勘探发展历程	(1)
1.1.1 激发震源	(1)
1.1.2 记录系统	(2)
1.1.3 导航定位	(2)
1.1.4 运载设备	(2)
1.1.5 滩浅海地震资料采集技术	(3)
1.1.6 滩浅海地震资料处理技术	(3)
1.2 滩浅海地震勘探难点	(4)
1.2.1 地震资料采集难点	(5)
1.2.2 地震资料处理难点	(5)
2 滩浅海地震资料采集关键技术	(7)
2.1 滩浅海地震资料采集设计技术	(7)
2.1.1 海陆一体化采集设计技术	(7)
2.1.2 OBS 采集设计技术	(18)
2.2 综合导航定位技术	(25)
2.2.1 导航定位基本方法	(26)
2.2.2 OBC 导航定位技术	(27)
2.2.3 海底高程测量	(28)
2.2.4 导航定位设备及软件	(29)
2.2.5 仪器记录、气枪激发、导航定位同步控制技术	(31)
2.3 检波点二次定位技术	(35)
2.3.1 声学二次定位技术	(35)
2.3.2 初至波二次定位技术	(42)
2.3.3 声学与初至波联合定位技术	(45)
2.4 气枪阵列设计技术	(50)
2.4.1 气枪阵列相关概念	(51)
2.4.2 气枪阵列设计理论	(52)
2.4.3 气枪阵列设计原则	(58)
2.4.4 气枪阵列设计	(59)
2.5 质量控制技术	(68)
2.5.1 导航定位质量控制技术	(69)
2.5.2 气枪质量控制技术	(72)
2.5.3 地震数据质量控制技术	(76)

3 滩浅海地震资料处理关键技术	(84)
3.1 滩浅海地震资料的特点	(84)
3.1.1 噪声特点	(84)
3.1.2 振幅、频率、相位特点	(86)
3.2 噪声衰减技术	(89)
3.2.1 自适应高频噪声衰减技术	(90)
3.2.2 强涌浪振幅异常压制技术	(90)
3.2.3 有源干扰压制技术	(91)
3.2.4 十字排列锥形滤波技术	(92)
3.2.5 叠前四维随机去噪技术	(92)
3.2.6 多次波压制技术	(94)
3.3 一致性处理技术	(97)
3.3.1 不同震源、检波器信号一致性调整	(98)
3.3.2 地震数据能量一致性处理	(100)
3.3.3 地震数据信号一致性处理技术	(102)
3.3.4 地表一致性时差校正	(105)
3.3.5 信号一致性处理自相关属性分析	(106)
3.4 海底电缆多分量处理技术	(107)
3.4.1 海底电缆双检处理技术	(108)
3.4.2 海底电缆四分量处理技术	(115)
4 典型实例	(126)
4.1 渤海湾 XG 地区三维地震资料采集项目	(126)
4.1.1 地震资料采集难点	(126)
4.1.2 主要技术对策	(127)
4.1.3 地震资料采集效果	(130)
4.2 沙特波斯湾沿岸某探区三维地震资料采集项目	(131)
4.2.1 地震资料采集难点	(131)
4.2.2 主要技术对策	(132)
4.2.3 地震资料采集效果	(135)
5 前景展望	(137)
5.1 宽频带、宽方位、高密度三维地震勘探技术	(137)
5.2 海底节点 (OBN) 地震资料采集技术	(139)
5.3 气枪震源高效激发技术	(140)
5.4 泥枪震源	(142)
参考文献	(143)

1 滩浅海地震勘探概述

1.1 滩浅海地震勘探发展历程

大港物探在国内最早从事滩浅海地震勘探业务。1973 年首次涉足滩涂地震勘探, 1984 年应用麻花钻气枪完成水库区勘探, 1992 年应用阿克托斯 (AKTOS, 也称阿里克斯) 泥枪系统作为激发震源首次进入极浅海, 1994 年首次应用海豹气枪震源系统完成一个浅海地震采集项目, 同年应用水中炮激发 (炸药) 完成 4 个滩浅海地震采集项目, 实现了由滩涂向浅海的跨越。40 年来, 滩浅海地震勘探工作经历了起步、发展、成熟阶段, 激发震源由电火花、泥枪、炸药 (水中) 激发, 发展到系列气枪震源系统; 地震数据记录由陆地系统应用于滩涂、极浅海作业, 发展到滩浅海专用记录系统; 测量定位工作由陆地测量设备、方法应用到海上, 发展到海上专用导航定位设备与软件系统; 采集设备运载工作由人抬肩扛发展到以专用机械设备为主作业。

1.1.1 激发震源

1973 年, 大港物探首次在渤海湾滩涂区域开展地震勘探工作。1974 年, 与中国科学院电工研究所合作, 采用 24 道等浮电缆, 开展了电火花震源海上地震勘探攻关试验。1979 年, 随着电火花震源装备的发展, 电火花队参加了滩海水域地震勘探作业施工, 完成了一定的试验工作量。因电火花震源激发能量弱、作业成本高、安全隐患大, 一直没有在后续海上地震勘探中大规模推广应用。进入 20 世纪 90 年代初, 电火花震源基本停用。

1985 年, 大港物探 372 联队在美国西方地球物理公司的技术指导下, 首次应用麻花钻气枪震源 (井深 3m) 完成了水库区地震勘探资料采集项目。1992 年, 从加拿大引进了两套适合沼泽和滩涂潮间带地震勘探作业的滩海气枪震源系统——阿克托斯, 该系统配备两台发动机、两台小型发电机和一台空压机, 有履带和水推两套动力系统, 配备 GCU—8 枪控系统 and 4 条泥枪, 1994 年正式投入地震勘探采集作业, 仅应用一个采集项目。

1993 年, 开始设计建造浅海气枪震源系统。1993 年 3 月, 第一艘可解体浅海气枪震源船 (海豹一号) 下水, 船体由 10 个可拆解模块组成。气枪震源系统有 1 台 LMF—GD5624W35 空压机、美国 MACHA 公司的 GCU—8 枪控系统、BOLT2800L—X 气枪。气枪阵列采用侧吊方式作业, 配备通信、定位系统。海豹一号气枪震源系统建成后, 同年即投入生产, 完成 47.6km² (计 10855 炮) 的三维地震勘探资料采集任务, 标志着气枪震源系统在浅海区应用的开始, 滩浅海地震勘探装备、技术进入快速发展时期。

1994 年以前, 在滩浅海地震勘探采集项目中, 浅海区均采用炸药震源水中激发; 1994 年至 1998 年, 部分采用气枪震源激发, 部分采用炸药震源水中激发; 1995 年, 海豹二号、海豹三号气枪震源船建成下水, 气枪震源逐渐取代炸药震源水中激发作业方式; 至 1999 年, 浅海区地震作业时气枪震源完全取代了炸药震源。

1.1.2 记录系统

1984 年引进了 Digiseis - 200 型无线遥测数字地震仪, 用于滩涂、极浅海地震勘探。在此之前, 主要采用陆地地震仪开展滩涂地震勘探采集。

1986 年从美国 AAI 公司引进 Opseis - 5500 型无线遥测地震仪。在之后 5~6 年的时间里, 该仪器一直是滩涂采集作业中的主要仪器。

1992 年从美国 Fairfield 公司引进两套 Telseis - RTDT 系统, 从 Opseis 公司引进了 1 套 Opseis - eagle 系统, 用于 3 个海滩队的组建与改造, 之后这 3 套采集系统成为当时滩涂地震勘探采集的主要仪器。

1999 年引进美国 Fairfield 公司的 BOX 无线遥测地震勘探资料采集系统, 用于浅海地震勘探资料采集作业。2006 年, BOX 采集系统被淘汰。

2003 年, 开始引进法国 SerCEL 公司 408ULS 仪器系统, 用于滩浅海地震勘探资料采集作业。408ULS 仪器的引进与应用提高了滩浅海地震勘探资料采集质量与效率。

1.1.3 导航定位

1990 年以前, 滩海区地震勘探测量工作一直沿用陆地测量设备和方法。1990—1993 年, 为适应滩浅海测量工作的需要, 先后从美国 Del Norte (德尔诺特) 公司引进了三应答微波定位系统, 用于滩浅海地震数据采集测量放样工作。1992 年, 引进美国 Trimble (天宝) 公司生产的 4000SE 静态 GPS。

1994 年, 引进美国 Del Norte (德尔诺特) 公司生产的 3006 差分定位仪。该仪器主要用于海上地震测线布设, 可在移动的船只或其他运载设备上实时导航定位, 并实时记录船只所在的位置。同时引进的 Hydro 导航软件可适用多种型号的定位设备, 实现与地震仪、气枪震源的联机放炮。

20 世纪 90 年代中后期, 滩涂、极浅海成为大港物探的主要勘探区域, 水深测量仪器开始全面应用, 主要有 SCY1 - 2 (天津海洋研究所) 和 Innerspace448 (美国制造), 测深范围为 0~50m, 测量精度为 $0.1 \pm 0.5\%$ (m)。

进入 2000 年后, 导航设备升级为 GPS 信标仪、GPS 星站差分仪。采用 GPS 定位, 能够实时导航, 作用距离无限制。2005 年自主研发的 HydroPlus 导航定位软件投入使用。

1.1.4 运载设备

为解决滩浅海地震勘探资料采集过程中作业人员和地震专用设备、物资等运输问题, 我国的滩浅海设备科研人员付出了艰苦的努力, 相继引进、消化吸收和自主研发了泥里爬 (履带式运输车的俗称)、赫格隆、空气船、气垫船、挂机橡皮船、放缆船、钻井艇等一系列滩海运载设备, 使我国的滩浅海勘探设备达到了国际先进水平。

(1) 泥里爬。1981 年, 购进 4 台 PG801 型泥里爬, 投入生产, 其中部分泥里爬装配 701 型钻机, 初步改变了滩涂作业人抬肩扛的施工作业模式。1984—1986 年, 由 2197 队和 2205 队联合组建 372 队与美国西方地球物理公司合作。西方公司带来了一批先进的运载设备, 其中有 25 条泥里爬。泥里爬作为 20 世纪 80 年代滩涂勘探生产的主要运载设备, 参加了大港探区、冀东探区、辽河探区的滩涂施工。1986—1988 年, 研制了滩涂淤泥作业车, 用于滩涂地震勘探资料采集作业设备运载。

(2) 赫格隆。1991年6月, 组建和改造了海滩队。1992年3月, 购置了34台瑞典产的赫格隆, 型号分别为BV-206D1 赫格隆标准车、BV-206D2 赫格隆运输车、BV-206D3 赫格隆钻机车。赫格隆车采用德国奔驰发动机, 载重2100kg, 最大牵引力25000N, 采用橡胶履带式行走装置, 适用于沼泽及水深小于2.0m的水域。赫格隆的引进提升了滩涂勘探作业的运载能力, 在滩涂、极浅海施工中发挥了重要作用。

(3) 空气船。1985年5月, 引进美国空气船并投入使用, 载重800kg, 采用风舵式转向, 为滑行行走方式, 适用于稀泥和浅水水域。1992年4月, 自行研制了10艘空气船, 型号为HT-600。2004年7月, 购置20艘空气船。2005年12月, 再次购置12艘, 满足了滩浅海采集项目的需要。

(4) 气垫船。1982年, 购进2艘上海产7202型气垫船用于海滩施工。组建372队后, 又购进两艘、自制两艘气垫船。1987年5月, 由杭州东风船厂制造1艘气垫船, 载重1000kg, 采用风舵转向方式, 风力推进行走方式, 适用于较为平静水面区域施工。2002年10月, 建造了1艘HY-2000气垫船。

(5) 挂机橡皮船。挂机橡皮船是滩浅海勘探野外生产中使用数量最多的滩海运载设备。1984年, 与美国西方公司合作组建的372队, 首次购进8条25马力的挂机橡皮船。1993年后, 勘探区域由滩涂进入较深水域, 为了满足生产需要, 多批次引进Yamaha挂机和配套的橡皮艇。

(6) 放缆船、钻井艇。2004年, 自行设计制造了轻型放缆船、钻井艇, 并于2005年、2006年、2009年先后对放缆艇进行了改进, 将螺旋桨推进改为水推式行进, 同时建造了铝合金、钢铁等不同型材的放缆船和钻井艇。

至此, 基本形成了完善配套的滩浅海地震资料采集运载设备。

1.1.5 滩浅海地震资料采集技术

1985年以前, 滩浅海地震资料采集仅在滩涂、极浅海区开展了少量的二维试验工作。1985年, 完成了水库区、滩涂区两个二维地震资料采集项目, 标志着二维地震资料采集技术在滩涂区工业化生产应用的开始。

1991年, 三维地震资料采集技术应用于滩涂、极浅海地区, 采用井炮激发。1993年, 完成了首个浅海二维地震采集项目, 采用炸药水中激发, 标志着浅海地震勘探技术工业化应用的开始。

1994年, 气枪震源应用于浅海三维地震勘探资料采集。1999年, 气枪震源全面取代炸药水中激发方式, 浅海气枪震源系统设计制造技术由起步走向成熟。

2003年开始, 在前期研究、应用的基础上, 进一步系统地开展了滩浅海地震勘探资料采集关键技术、装备和资料处理关键技术的研究与应用, 形成了滩浅海一体化地震勘探资料采集技术、海底检波点定位技术、OBC导航定位技术、气枪阵列设计技术、质量控制技术等, 并全面应用于滩浅海地震勘探项目中。

1.1.6 滩浅海地震资料处理技术

1992年以前, 滩浅海地震资料处理基本采用陆地的地震资料处理技术和方法。

1992年1月, 引进大型的IBM3083计算机系统, 安装了美国西方地球物理公司的软件包, 开始采用具有地表一致性功能的全三维处理技术对滩浅海地震资料进行处理, 较好地

解决了滩浅海地震资料的振幅、频率和相位的差异。

1994 年承担了美国陆安公司在中国的滩浅海风险勘探项目赵东油田的地震资料处理工作，开始采用确定性气枪子波反褶积对气枪的子波进行处理，较好地解决了气枪的气泡振荡和混合相位的问题。

1997 年 12 月，从 PGS TENSOR 公司引入了 RS/6000-SP-2 并行机处理系统，初步具备了 OBC 两分量和四分量的处理功能。并用该系统完成了 2001 年大港油田在赵东油田采集的 OBC 四分量地震数据的处理工作。

2004 年引入 CGG 的 Geocluster 处理系统，具备了滩浅海地震数据处理的多次波去除的 SRME 技术。

2011 年安装了 GeoEast 系统的多波处理软件包，具备了配套的面向各向异性的叠前偏移的海上多分量处理功能，大大提高了海上多分量的处理能力和精度。

1.2 滩浅海地震勘探难点

滩浅海地震勘探难点主要来自特殊的地表类型（图 1.2.1）。典型的滩浅海地震勘探项目的地表类型包括陆地、滩涂、潮间带、浅海。陆地部分可能为沼泽、平原、山地、沙漠、城镇、工业区、养殖区等，滩涂部分可能为泥滩、沙滩、沙砾滩等，浅海区海水深度、海流情况受潮汐、海底地形变化影响大，通常海水养殖业、渔业、航运发达（图 1.2.2）。复杂多变的地表类型为地震勘探带来了特殊的问题和困难。

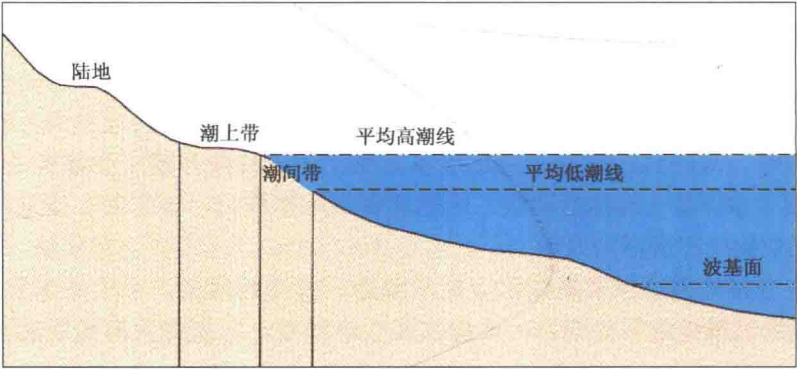


图 1.2.1 滩浅海地表类型示意图



图 1.2.2 不同的滩浅海类型

1.2.1 地震资料采集难点

(1) 滩浅海地表类型复杂, 陆地、滩涂与浅海地震资料采集作业特点不同, 陆地、滩涂部分排列作业收放成本低, 激发成本高 (尤其是炸药震源)。浅海部分排列作业收放成本高, 气枪震源激发作业效率高、成本低。陆地、滩涂、浅海的接收、激发条件不同, 需要根据地表类型变化配备不同的采集设备。因此, 纯粹的陆地或海上作业相对简单, 而实现滩浅海地区一体化采集难度较大。

(2) 检波点点位精度直接影响到地震资料采集质量。对于潮间带、浅海地区, 潮汐、风浪、海流等共同构成动态的水体环境。以渤海湾为例, 每天两次涨落潮, 每月两次大潮, 潮差为 2~4m, 涨落潮期间形成速度为 0.2~0.4m/s 的潮流。局部受海底地形变化的影响, 潮流速度会显著增大。河流入海口处, 受潮汐、河水流动共同影响, 将近岸区切割成指状沙坝和海沟, 海沟内海水流速可达 1.3m/s。浅海 OBC (OBN) 采集作业过程中检波器位于海底, 检波点点位不能直接测量。受水深、海流、放缆船运动等因素影响, 检波器落到海底的位置将偏离原设计点位。地震资料采集过程中受潮汐、海流等因素影响, 检波器可能会再次偏移。因此, 在滩浅海地震资料采集过程中, 确定海底检波点点位困难。

(3) 对于滩浅海地区, 浅海、极浅海是其重要组成部分, 也是作业方法、采集装备与陆地、深海区别最大的部分。应用气枪震源激发、OBC 记录系统接收进行地震资料采集过程中, 气枪震源系统需要独立导航控制, 满足震源船导航上线和气枪激发定位要求; OBC 放缆系统需要独立导航控制, 满足放缆船导航放缆和检波器在海面投放定位要求。同时, 导航定位系统还要气枪激发、仪器记录同步控制等要求。另外, 在 OBC 地震资料采集过程中, 气枪震源船、放缆船、仪器记录船等作业船只独立作业, 导航定位系统还要满足质量控制数据传输、多船作业协调控制 (监控) 等要求。

(4) 不同地区、不同地震资料采集项目所涉及的浅海、极浅海海况 (水深变化、海底地形变化, 岛礁、沙坝发育程度等) 不同, 气枪震源系统设计需同时满足海况条件决定的作业环境要求和地震资料采集项目对气枪震源激发技术指标的要求。典型的浅海、极浅海气枪震源运载系统应具备水深变化适应能力强 (满足深水、浅水、极浅水作业)、上线灵活稳定、气枪阵列收放方便等特点。对于封闭或受限水域 (内海、湖泊等), 整套气枪震源系统不能通过水路直接进入作业区域, 气枪震源系统的设计制造要考虑陆路运输、作业现场组装/拆解等问题。

(5) 滩浅海地震资料采集涉及多种震源激发 (陆地可控震源、炸药震源、气枪震源等), 多种检波器接收 (陆地检波器、沼泽检波器、压电检波器、双检等), 多种仪器系统 (陆地地震仪、OBC 记录系统、海底节点记录系统等), 不同测量定位设备、方法 (陆地 GPS 定位、海上综合导航定位)。地表类型多变 (陆、滩、海、岛礁、工业设施等), 海上作业环境多变 (潮汐、风浪、海流等)。因此, 滩浅海地震资料采集需要综合考虑上述复杂条件下的设备状态, 地震资料的质量控制相对比较困难。

1.2.2 地震资料处理难点

(1) 对于滩浅海地区, 陆地、滩涂、浅海等不同地表 (包括近地表) 类型变化直接决定了地震波激发介质不同、接收环境不同; 陆地可控震源、炸药震源、气枪震源等不同类型震源激发的地震子波特征不同; 模拟检波器、数字检波器、压电检波器工作原理、响应

特性（频率、相位）不同。以上因素造成地震资料振幅、频率、相位等属性上的差异，因此，滩浅海地震资料一致性处理困难。

（2）滩浅海地震资料干扰噪声与地表类型、作业环境直接相关，主要干扰类型有浅海区的涌浪干扰、高频噪声干扰，大船、海上石油平台等有源噪声干扰，侧反射干扰，海面虚反射干扰，复杂海底多次波等，地震资料处理噪声衰减困难。

（3）海底电缆采集的两分量数据在能量、频率、相位、信噪比等方面都存在着明显的差异，两分量数据要达到有效的合成，较好地压制海水层的鸣震比较难。

（4）海底电缆采集的四分量数据，在采集过程中受海底地形、洋流、涌浪、潮汐和施工工艺等的影响，很难保证检波器的 $\approx$ 分量、P-SV 分量和 P-SH 分量相互之间的完全垂直，因此，各分量之间波场相互混叠，四分量数据的矢量保真度处理难度大，同时转换波资料的静校正和成像处理也很困难。

2 滩浅海地震资料采集关键技术

滩浅海地区一般指海边沿岸带从一定水深向陆上延伸到一定距离的区域,包括浅海、潮间带、滩涂和与之相接的陆地,如平原、城区、水网、沙漠或山地等,受潮汐的影响较大,地表条件复杂多变。相比陆上勘探来说,滩浅海地震勘探采集主要面临着资料信噪比低,施工点位控制难,采集设备适应性要求高,现场质量控制点多等技术难题。这几年,随着滩浅海地震勘探采集技术进步和装备的发展,解决滩浅海地震勘探技术难题的能力显著增强,尤其是一体化采集设计、综合导航定位、海底检波点定位、气枪阵列设计、质量控制等五项关键技术的创新发展,对推动滩浅海地震勘探技术进步,确保滩浅海勘探地质效果起到了重要作用。

2.1 滩浅海地震资料采集设计技术

随着物探技术的发展,当前的地震资料采集设计多数都是基于地质目标的设计。其主要工作一般包括:根据勘探对象和地质任务,分析工区内存在的技术难点和以往地震资料存在的问题;建立地球物理模型,对每个采集参数的约束条件进行定量定性计算和分析;以及综合优化参数,结合现有技术、装备、成本等条件,优选出最佳的地震勘探采集参数。

滩浅海地区地震资料采集设计虽然也是基于地质目标的设计,但由于其特定的作业条件、施工方法,使得滩浅海地震资料采集设计既有别于海上拖缆设计,也有别于陆上设计,有着其自身的特殊性:(1)围绕地表类型和施工条件进行的采集设计,如海陆一体化采集设计等;(2)围绕作业装备进行的采集设计,如海底地震勘探(OBS)采集设计等。

2.1.1 海陆一体化采集设计技术

海陆一体化采集设计技术的主要目的是针对集陆地、滩涂、浅海等多种复杂地表类型为一体的勘探项目,为解决海陆联合施工作业、资料拼接等关键技术问题,在基于地质目标设计的基础上,综合考虑地表类型、作业装备、施工效率和成本等因素,提出一体化的观测系统、激发和接收等技术解决方案,使地震资料采集设计与复杂多变的地表条件相适应,最大限度保证地下面元属性分布的一致性,实现陆滩海等不同地表类型之间资料的无缝连接(图 2.1.1)。海陆一体化采集设计技术主要有观测系统一体化设计技术、接收参数一体化设计技术和激发参数一体化设计技术。

2.1.1.1 观测系统一体化设计技术

滩浅海地震勘探野外采集一般由陆地、滩涂过渡带到海域,随着地表类型、作业环境的变化,其采集观测系统也往往随之变化。这种海陆观测系统的参数差异和海陆观测系统间的拼接方式将影响整体采集资料效果和数据处理效果。

海陆观测系统一体化设计技术就是在基于地质目标采集设计的基础上,重点围绕海陆观测系统特点及其相互间拼接的差异性,优选耦合性好的海陆观测系统,优化拼接方案,



图 2.1.1 海陆一体化采集施工图

以保证海陆观测系统拼接处面属性的一致性，从而保证海陆一体化采集的资料效果。

2.1.1.1.1 海陆观测系统设计

滩浅海地震勘探采集一般分为两部分，陆上采集和海上采集。陆上采集一般采用炸药或可控震源激发，海上采集相比陆上要复杂一些，在滩涂或小于一定水深的地区宜采用炸药激发，在达到一定水深的地区采用气枪激发。

就陆地和滩涂地区三维地震资料采集而言，一方面，其检波点的位置比较容易确定，并且检波器的埋置相对比较容易，受外界影响造成点位变化的可能性较小；另一方面，炮点的重复激发比较困难，特别是对炸药震源来说，在同一激发点多次激发的环境会有很大的变化，从而造成激发效果差别较大。对浅海 OBC 三维地震资料采集而言，情况与陆地和滩涂地区相反，其激发点的点位能够很好地重复，但是其检波点的位置容易受到潮流等外界因素影响而发生变化，使得点位较难精确控制和测定。

基于上述特点，陆地和滩涂地区的三维观测系统与浅海 OBC 的三维观测系统往往不尽相同。当陆地和滩涂与浅海分开采集时，其观测系统很少相同；即使是在同一个海陆过渡带一体化采集项目中，其陆地和滩涂的观测方式与浅海的观测方式也可能不会完全相同。

通常情况下，在设计陆地和滩涂三维采集观测系统时，对其横向滚动一般采用重复排列，而炮点不重复的采集方式。并且在资源允许的情况下，一般采用增大接收道数，减少激发点数的采集方法（图 2.1.2a）。在设计浅海 OBC 三维地震资料采集的观测系统时，对其横向滚动一般采用激发点重复，而接收排列不重复，并且尽量增加激发点数，减少接收道数（图 2.1.2b）。



图 2.1.2 海陆观测系统模板图

a—陆上滩涂炸药激发观测系统模板；b—滩涂海上气枪激发观测系统模板。

红色为接收点，绿色为激发点，灰色为未激活模板

2.1.1.1.2 海陆观测系统的拼接

(1) 拼接要求：一个优化的拼接方案应该能够使拼接处面元的覆盖次数等基本属性具有连续性、一致性，其中覆盖次数的一致性主要是指横向覆盖次数的连续性和一致性。这

种面元属性的一致性不仅仅表现在理论的拼接方式上，在实际实施时也能使面元的覆盖次数从陆地和滩涂观测系统均匀渐变到浅海 OBC 观测系统，其他属性，如面元的炮检距分布、方位角属性等，也能从陆地和滩涂观测系统渐变到浅海 OBC 观测系统。

(2) 基本原理：要实现拼接处面元属性的一致性，使陆地和滩涂与浅海 OBC 观测系统的面元属性保持一致，一般采用陆地和滩涂观测系统与浅海 OBC 观测系统炮检点互换方法，即陆地和滩涂观测系统横向滚动时排列的滚动距离、排列重复数与浅海 OBC 观测系统横向滚动时炮点的滚动距离、炮点重复数互换。如陆地和滩涂为 16 线 32 炮 240 道中间对称观测系统，浅海 OBC 采用 8 线 64 炮 240 道中间对称观测系统，当这两种观测系统采用重复排列的拼接方式时，就能够使面元属性完全一致（图 2.1.3）。

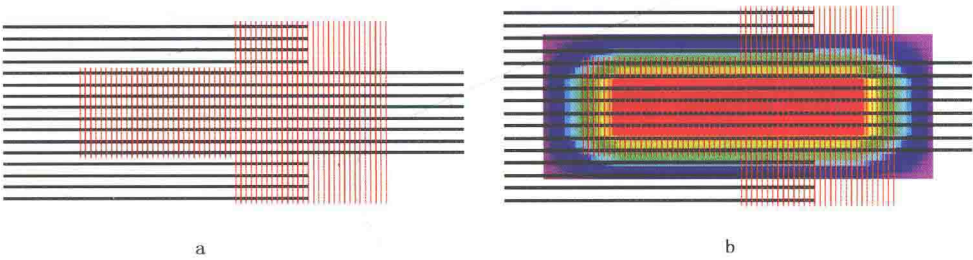


图 2.1.3 海陆观测系统拼接
a—海陆观测系统拼接炮检点图；b—海陆观测拼接覆盖次数图。红色为激发点，黑色为接收点

为了形象地说明这种炮检点互换设计的面元属性等效特点，我们将陆地和滩涂用的 16 线 32 炮的排列进行拆分，一分为二，变成两半，即两个 8 线 32 炮观测系统（图 2.1.4a），之后将上下两个观测系统位置互换，将排列重叠，即为浅海 OBC 采用的 8 线 64 炮观测系统（图 2.1.4b）。

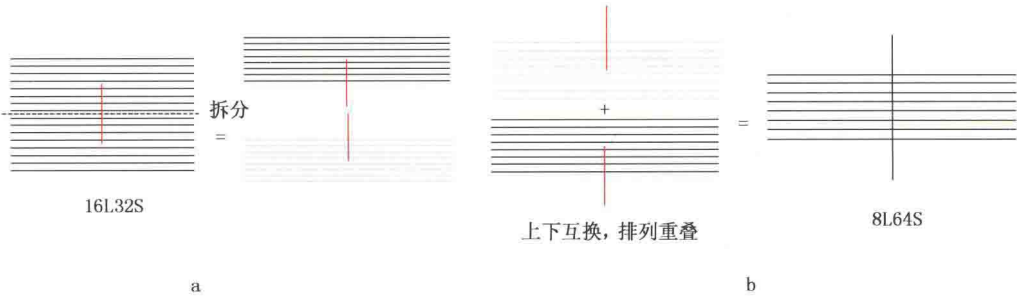


图 2.1.4 炮检点互换图解
a—拆分观测系统，一分为二；b—上下位置互换，重叠排列。红色为激发点，黑色为接收点

(3) 拼接方法：海陆观测系统拼接一般由观测方向确定，当观测系统方向垂直于海岸线时采用纵向拼接方法。当观测系统的方向平行于海岸线时，采用横向拼接法。

纵向拼接：根据排列的变化，可分为转变法和渐变法。转变拼接法，即海陆观测系统过渡时，陆地炮点用陆地观测系统对应的排列接收，海上炮点用海上观测系统对应的排列接收，海陆观测系统及排列瞬间发生转变。转变拼接法的最大特点是能够最大限度地保持海陆不同部分的面元属性的一致性。不足是在实施陆上炮点时需要占用较多的海上资源，实施海上炮点时陆上资源出现闲置（图 2.1.5）。