



# 海洋地震勘探 新技术与应用

王守君 杨凯 唐进 编著

石油工业出版社

# 海洋地震勘探新技术与应用

王守君 杨 凯 唐进 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书以反映海洋地震资料采集的新方法、新技术及应用效果为主线,重点介绍了海洋地震勘探的震源、导航定位。另外,本书也对中国海油自主研发的海上单检高密度地震资料采集设备做了介绍。主要内容包括:海洋地震勘探简介、海上导航定位技术、空气枪震源立体组合技术、拖缆上一下缆地震资料采集技术、拖缆双检地震资料采集技术、拖缆高密度地震资料采集技术、斜缆宽频地震资料采集技术、海上宽方位地震资料采集技术、海底电缆地震资料采集技术。

本书可供石油物探专业人员了解和掌握海洋地震方法与技术时参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

海洋地震勘探新技术与应用/王守君等编著.  
北京:石油工业出版社,2016.8

ISBN 978-7-5183-1411-9

I. 海…

II. 王…

III. 海洋物探-地震勘探

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 180293 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

编辑部:(010) 64523533 图书营销中心:(010) 64523633

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

---

2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.75

字数:280 千字

---

定价:98.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# Preface

## 前言



在浩瀚的大海上寻找油气最有效、成功率最高的方法是地球物理勘探方法，其中主要是地震勘探法。随着海洋地震勘探技术的不断进步，地震勘探法在海洋油气资源勘探开发的全生命周期中发挥着越来越重要的作用。在油气勘探阶段，利用地震资料不仅能确定盆地结构、查明地下构造的空间形态、展示断裂分布、落实圈闭类型，而且能够预测地层岩性、储层空间展布、储层参数，甚至能直接检测油气，指示地下油气的存在。在油藏评价阶段，利用地震资料，结合测井、岩心和其他地下地质资料，能够对油藏进行描述，反演物性参数，准确评估储量。在油气田开发阶段，利用地震资料建立油藏模型，能够对油藏进行静态和动态预测，合理确定开发方案。在油气田生产阶段，利用地震资料结合油气生产动态资料，可以寻找和监测剩余油分布，部署调整井，提高采收率。

随着油气勘探开发的不断深入，世界海上剩余的油气资源不是分布在复杂的圈闭中，就是储集在深层、盐下和深水等勘探前缘区。海洋油气田的高效开采，需要有高质量的地震数据描述油气藏，监测油气藏动态变化，寻找剩余油气分布，不断提高采收率。这就要求海洋地震勘探技术不断地接受复杂地质、恶劣海洋作业环境和提高地震勘探生产效率的挑战，不断地创新方法和技术。

近十多年来，国际海洋石油地震勘探领域涌现出了许多新的采集方法和处理技术。在激发方式上，从平面震源发展到多层震源、立体震源；在接收方式上，从水平电缆接收反射地震数据发展到上—下缆和斜缆（变深度电缆）接收宽频地震数据，从单一的压力型检波器电缆发展到速度和压力组合的双检波器电缆；在海陆过渡带、海上生产设施密集区、深海区，又升级和发展了多分量海底电缆技术和节点海底地震勘探技术；在海洋三维地震勘探中，传统的拖缆地震数据采集，从直线航行的窄方位角数据采集发展到多方位、宽方位和环形全方位角数据采集，从低密度数据采集发展到高密度数据采集；导航定位技术与电缆控制技术也不断升级和完善，从三网络定位发展到全电缆声学定位网络，电缆控制也从纵向控制发展到纵向与横向综合控制。这些新技术、新方法的应用，有效地克服了常规海洋拖缆地震勘探的不足，增加了地震原始信号的低频分量，拓宽了反射地震波频带，增强了对地下复杂构造的地震波场照明度。数据经过有效处理，提高了一次反射信号的信噪比和复杂构造的成像精度，满足了复杂油气田勘探和开发的需求。

中国海洋石油地震勘探经过几十年的探索与实践，兼以几代同仁的不懈努力，地震勘探的数据采集装备得到了极大的改进，数据处理技术和解释方法也得到迅速的发展，与世



界同步。中国海洋石油总公司（以下简称中国海油）以开放的胸怀，迎来了国际上先进的地球物理公司在中国海域作业，这些公司带来了先进的方法和技术，也促进了中国海油物探技术的整体提升。国内外海洋地震勘探作业船队在中国渤海、南海、东海和南北黄海的广泛海域实施地震勘探作业中，采集到了高品质的原始地震勘探数据，经过后期室内资料处理和解释，建立了科学合理的地质模型，为发现中国海域的油气田和高效开发油气田降低了地质风险，产生了巨大的经济效益和社会效益。

在工作中常有同行来询问笔者了解海洋物探的新方法和技术应用情况，有怎样的认识和评价，效果怎样。慢慢地笔者萌生了一个想法，将近些年在中国海上用过的地震勘探新方法和新技术做一个总结，介绍给读者。在编写过程中，笔者也反复思考一个问题，这本书应该突出怎样的主题，贯穿一条怎样的主线，应该具备怎样的特点。由于海洋地震勘探的资料采集、处理、解释与陆地的本质区别就是资料采集，一层海水使海陆的资料采集从震源到接收的实现方法和技术完全不一样。海上辅助手段和技术多，面临的挑战也多，各种方法解决问题的着眼点不尽相同；资料处理除了针对特殊问题外，海上和陆上的方法和流程差别不大；而资料解释是使用同样的工具和软件，技术方法几乎一样。所以本书还是试图突出海洋地震资料采集这个主题，资料处理方面主要是提及思想方法，不论述处理技术，不求叙述处理细节，不设专题章节。在资料采集方面，也不打算系统介绍海洋地震资料采集的方法技术，因为社会上已经有这方面的出版物。考虑到近 10 年来在国内海域相继开展多项海洋地震勘探新技术的试验和应用，取得了比较好的效果，代表了海洋地震勘探的发展和走向，最后决定本书应以反映海洋地震资料采集的新方法、新技术及应用效果为主线。鉴于以前的出版物中反映海洋地震勘探的震源、导航定位的内容不多，而这又是海洋地震勘探的特点所在，所以侧重介绍了这部分内容。另外，中国海油自主研发了海上单检高密度地震采集设备，本书也做了介绍，供大家在了解和掌握海洋地震勘探方法与技术时参考。

在本书编写的过程中，得到许多同仁的大力帮助。在此要感谢孙宝喜、吴秋云对项目的支持，感谢毛宁波的编辑，感谢周滨、陈华、张振波、李列、顾汉明、李柳胜、张鹏、魏赞、赫建伟、阮福明、谢涛、邓勇、陈磅、郝振江、张善刚等提供的研究成果。正是在这些同志的支持下，本书才得以问世。

# Contents

## 目 录

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| <b>1 海洋地震勘探简介 .....</b>        | <b>( 1 )</b>  |
| 1.1 海洋地震勘探的基本原理 .....          | ( 1 )         |
| 1.2 海洋地震勘探的基本特点 .....          | ( 2 )         |
| 1.3 海洋地震勘探的主要新技术 .....         | ( 5 )         |
| <b>2 海上导航定位技术 .....</b>        | <b>( 8 )</b>  |
| 2.1 导航定位技术简介 .....             | ( 8 )         |
| 2.2 三维拖缆定位技术 .....             | ( 12 )        |
| 2.3 海底电缆定位技术 .....             | ( 20 )        |
| <b>3 空气枪震源立体组合技术 .....</b>     | <b>( 26 )</b> |
| 3.1 空气枪震源基础 .....              | ( 26 )        |
| 3.2 震源组合的基本原理 .....            | ( 34 )        |
| 3.3 平面震源与立体震源 .....            | ( 37 )        |
| 3.4 立体震源设计 .....               | ( 43 )        |
| <b>4 拖缆上一下一缆地震资料采集技术 .....</b> | <b>( 52 )</b> |
| 4.1 上一下一缆采集的技术原理 .....         | ( 52 )        |
| 4.2 上一下一缆波场分离技术 .....          | ( 55 )        |
| 4.3 国内外应用实例 .....              | ( 56 )        |

|          |                       |                |
|----------|-----------------------|----------------|
| <b>5</b> | <b>拖缆双检地震资料采集技术</b>   | <b>( 69 )</b>  |
| 5.1      | 拖缆双检地震资料采集技术基本原理      | ( 69 )         |
| 5.2      | 拖缆双检波场分离              | ( 71 )         |
| 5.3      | 拖缆双检地震资料采集技术应用实例      | ( 73 )         |
| <b>6</b> | <b>拖缆高密度地震资料采集技术</b>  | <b>( 82 )</b>  |
| 6.1      | 高密度地震资料采集技术           | ( 82 )         |
| 6.2      | 高密度三维地震资料采集技术特点       | ( 83 )         |
| 6.3      | 单点高密度地震资料采集技术简介       | ( 85 )         |
| 6.4      | 高密度地震资料采集技术的应用        | ( 88 )         |
| 6.5      | 单点高密度地震勘探实例           | ( 95 )         |
| <b>7</b> | <b>斜缆宽频地震资料采集技术</b>   | <b>( 106 )</b> |
| 7.1      | 斜缆宽频地震资料采集技术原理        | ( 106 )        |
| 7.2      | 南海珠江口盆地斜缆宽频地震勘探实例     | ( 111 )        |
| 7.3      | “海亮”系统在斜缆宽频地震资料采集中的应用 | ( 116 )        |
| <b>8</b> | <b>海上宽方位地震资料采集技术</b>  | <b>( 121 )</b> |
| 8.1      | 海上宽方位地震资料采集技术         | ( 121 )        |
| 8.2      | 宽方位地震勘探实例             | ( 124 )        |
| <b>9</b> | <b>海底电缆地震资料采集技术</b>   | <b>( 135 )</b> |
| 9.1      | 中国近海开展海底电缆地震勘探的必要性    | ( 135 )        |
| 9.2      | 海底电缆三维地震勘探效果          | ( 143 )        |
| 9.3      | 海底电缆多波多分量地震勘探         | ( 152 )        |
|          | <b>参考文献</b>           | <b>( 163 )</b> |



# 1 海洋地震勘探简介

## 1.1 海洋地震勘探的基本原理

众所周知，在海洋油气勘探的各种地球物理方法中，使用最广泛、最关键、解决油气勘探开发问题精度最高、最有成效的方法就是地震勘探方法。其基本原理是通过人工震源激发产生在岩层中传播的弹性波，当遇到具有弹性差异的岩层分界面时，便产生反射波或折射波，在它们返回海底或海面时被高度灵敏的仪器记录下来，然后根据地震波的传播路程和旅行时间，确定产生反射波或折射波的岩层界面的埋藏深度和形状，从而认识地下地质构造和地层特征，寻找油气圈闭。无论是在陆地还是在海上进行的地震勘探一般应包括地震资料采集设计、地震资料采集、地震资料处理和地震资料解释 4 个环节。

### 1.1.1 地震资料采集设计

在实施地震资料采集前，要根据已经掌握的将要实施地震资料采集工区的基本地质资料和地质认识，并根据地质要求和将要完成的地质任务，以及施工海况环境和地震装备的可实现性，做出科学合理的评估和施工设计。这个环节的任务是在对已有资料分析（包括调查干扰波、分析资料品质、建立地震地质模型、进行波场照明分析）的基础上做出科学合理的资料采集参数论证。要设计震源配置及其模拟分析，使激发的震源脉冲响应最好、压制气泡效果最佳，且能量大小满足测量要求；设计的震源、电缆在水下的沉放深度合理，尽可能地接收到宽频带数据；设计的最大、最小偏移距和记录长度要符合资料处理的需要；设计的资料采集施工方向应尽可能地满足波场照明需要。这一阶段得到的成果是地震资料采集参数，包括震源配置、震源电缆沉放深度、电缆长度等关键参数，用以指导海上施工。现代地震勘探这一环节的工作越来越受到重视。

### 1.1.2 地震资料采集

地震资料采集环节的任务是在地质工作和其他物探工作初步确定的含油气远景区，部署地震观测测线，人工激发地震波，并用地震仪把地震波在地下地层传播的情况记录下来。进行野外生产工作的组织形式是地震队（船），由一条或多条专用船组成。这一环节的成果是地震船在海上沿着设计行船轨迹采集到大量的原始地震数据和综合导航数据，并将这些数据记录在磁带或其他介质设备上。

用于寻找海上油气田的地震反射法，在海上进行资料采集时有许多特殊性。海上地震勘探是以地震船的组织形式来完成的，可把地震仪器安装在船上，地震船尾部拖曳内置地震检波器的电缆、空气枪震源及其他水下设备。由纵向和横向电缆控制器控制电缆在水下的移动工作姿态，由尾标上的 GPS 和安装在电缆上的罗经准确确定电缆和检波器的位置。





海上震源通常采用空气枪震源，拖曳在船尾。地震船沿着预先设定的航线在航行中连续地进行地震波的激发与接收，实施地震资料采集。

海洋石油地震勘探始于20世纪60年代初，经历了从24道光点记录，到48道的模拟磁带地震仪、等浮电缆、96道数字地震仪，再到现在的多源多缆、数千地震道甚至上万地震道，水中多分量、海底多分量接收等技术的发展。

### 1.1.3 地震资料处理

地震资料处理环节的任务是根据地震波的传播理论、地震勘探的基本原理、信号分析与处理的各种方法等，利用大型计算机，对野外获得的原始数据进行各种去粗取精，去伪存真的加工处理工作，以及计算地震波在地层内传播的属性等。将地震船在野外观测到的地震数据精确成像是地震资料处理的关键。这一环节得出的成果是“地震剖面图”或具有高信噪比、高分辨率、高保真度的成果数据体，以及地震波速度场资料等。资料处理工作由配备了大型计算机和有关专用软硬件设备的处理中心或公司来完成。硬件设备包括网络设备、磁带机、计算机、绘图仪、浸入式可视化系统等。软件设备包括地震资料处理系统、导航资料处理系统等。

在油气勘探与开发的不同阶段，需要解决的地质问题不同，需要达到的处理目标也不一样；不同时期资料处理技术发展水平、计算机软硬件能力差异很大，都会影响地震资料的处理效果。因此，资料处理是一个多次反复的过程，面向目标的处理是资料处理工作的重点，每处理一次都会出现新的效果，都会对地质认识的形成起到潜移默化的作用。

### 1.1.4 地震资料解释

经过计算机处理得到的地震资料，虽然已能反映地下地质特征的一些特点，但是地下的情况是十分复杂的，地震剖面或数据体中的许多现象，既可能反映地下的真实情况，也可能存在某些假象。地震资料的解释工作就是要以地质理论和规律为指导，运用地震波传播的理论和地震勘探的方法原理，综合地质、测井、钻井和其他物探资料，对地震资料进行深入研究、逻辑推理、综合分析的过程，是地震勘探成果的综合体现。这通常借助于交互解释工作站来完成，计算机技术的发展也助推了解释技术的巨大提高。

地震资料处理和解释是面向地质目标、解决地质问题的两个工作流程、两个侧重方面，是不可截然分开的。资料处理需要了解地质模式、地质现象；资料解释需要理解波动理论、波动信息的地质意义，了解地震勘探技术的最新发展。因此，资料处理和解释是一体化的，常常交互进行，相互融合，只有这样才能得到正确的解释成果。解释成果包括目标层位的构造图、厚度图、各种属性描述图、油气检测及地质预测等成果报告。要特别重视综合利用勘探区域的其他地质资料进行地震资料的地质解释，实现发现油气的目的。

## 1.2 海洋地震勘探的基本特点

海上地震勘探工作相比陆地地震勘探主要在地震地质条件和野外施工上存在很大差异（图1.1），主要表现在地震地质条件、资料采集设备和野外采集施工方法等方面。

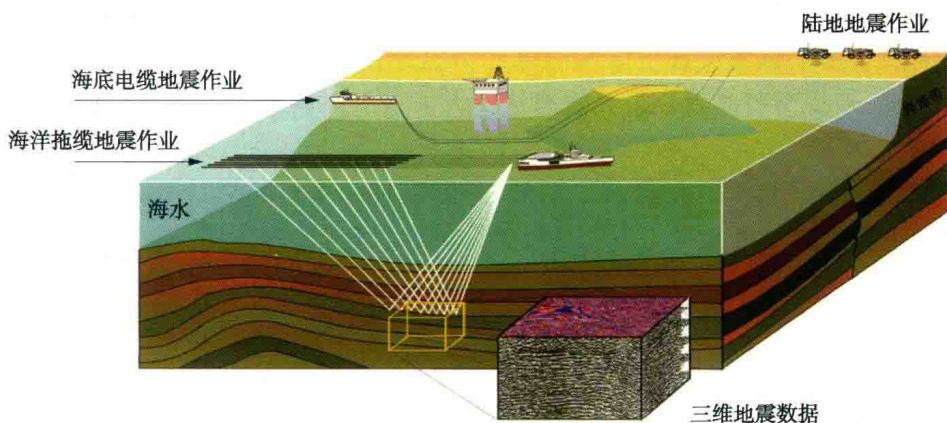


图 1.1 海上地震勘探示意图

### 1.2.1 地震地质条件的差异

(1) 表层结构的不同。陆地表层结构包含低、降速带。平原地区，表层是地表土、砂或土壤，其波速度仅  $300\sim 400\text{m/s}$ ；第二层为第四系砂、泥沉积，由于缺水，其地震波速度也很低，约  $500\sim 600\text{m/s}$ ；低速带以下为含水的第四系沉积，声波速度为  $1050\text{m/s}$  左右；再往下则是正常压实地层。上面三层就构成了陆地表层的低、降速带，每一层的厚度都有较大的变化范围。海上则不同，第一层是海水，波速  $1500\text{m/s}$  左右；第二层为第四系现代沉积，波速约  $1600\sim 1800\text{m/s}$ ，这对于地震波传播来说，与正常压实的地层几乎没有差别。因此，海上的表层结构更有利于高分辨率地震勘探。

(2) 表层一致性的差异。海水的一致性是非常好的，虽然不同海域因含盐量、温度的不同，海水的速度、密度不同，但其差异很小，且是大范围的小变化，对地震施工而言，可以看作是一致的。陆地表层一致性则很差：一是表层低、降速带厚度变化大，从几米到几百米；二是表层岩性变化大，河沟、湖泊的淤泥、黏土、粉细砂、岩石等，激发、接收条件都是变化的。

(3) 对地震波高频成分的能量吸收不同。地震波能量衰减与其传播的介质的品质因子 ( $Q$ ) 成反比，与地震波的频率成正比。海水具有极高的  $Q$  值，基本上不吸收地震波能量。水层中衰减地震波的因素主要是球面扩散，海水是均匀各向同性介质，对地震波频率的衰减也很小。而陆地上低、降速带对地震波的衰减却是惊人的。因此，海上比陆地更有条件实现高分辨率地震勘探。

### 1.2.2 海上地震施工的特点

海洋油气钻井成本高，为降低油气勘探开发风险，提高钻探成功率和勘探开发经济效益，现代海洋油气勘探一般采用三维地震勘探技术，用三维地震数据研究构造、沉积、储层、运移、圈闭等油气系统，寻找剩余油，确定井点位置及井眼轨迹。采用多源多缆地震船进行三维地震数据观测是主流方法，一般是采用  $6\sim 12$  条电缆进行大面积观测。图 1.2 是一条双源 6 缆地震船的实际三维地震资料采集工作状态，地震船在航行中连续地激发接收地震数据。图 1.3 示意的是一条双源四缆的基本配置，地震船两舷后方拖曳的电缆扩展器





将电缆一次平行分开，船尾后方是两个组合震源交替放炮。这种多源多缆采集方式的数据采集效率非常高，如中国海油在中国南海珠江口盆地使用 12 缆的海洋石油 720 号地震船，电缆间距 100m，双源交替激发，最高效率达一天采集了  $100\text{km}^2$  的三维地震数据。



图 1.2 海上多缆三维地震勘探

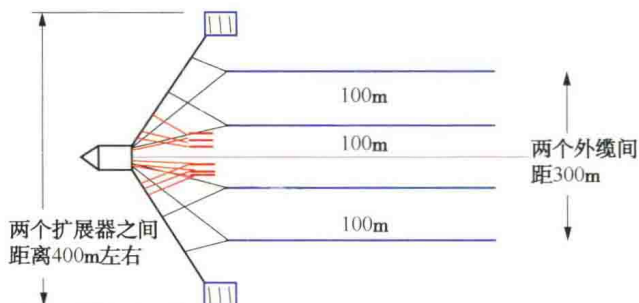


图 1.3 海上双源四缆配置示意图

常规海上地震勘探资料采集工作具有下述几方面的特点：

- (1) 使用非炸药震源，如空气枪；
- (2) 野外记录数字化，使用数字地震仪；
- (3) 使用等浮数字电缆（为了适应高覆盖次数的需要，等浮电缆的道数不断增加）；
- (4) 使用纵向、横向控制器（水鸟）进行电缆姿态的控制；
- (5) 一般为单船作业，记录仪器和震源配置在同一条船上，目前多船作业也逐渐增多；
- (6) 采用高次覆盖；
- (7) 采用综合导航定位技术实时确定船的位置和炮点、检波点的位置；
- (8) 在船上实时地进行地震数据的质量控制。

海上地震资料采集与陆地有较大的差异，由于物探船能够昼夜不停地在航行中激发和接收地震波，采集施工时船速通常是  $5\text{nmile/h}$  左右，因此生产效率很高。另外，由于激发和接收条件都是处于水介质的相同环境中，所以与陆地采集的资料相比，地震资料质量较高。在海上进行资料采集时，船的航行速度为常速很重要，因为它关系到震源的激发时间。但是船速受到风浪涌流等多种因素的影响，必须使用导航定位及时自动调节航速，才能保持它的恒定。

此外，在海上连续工作的情况下，还有一些影响地震多次覆盖的因素。由于海流的影响，接收电缆与设计测线往往具有一定的夹角（叫做电缆羽角），炮点间距也不均匀，在反射层倾角很大时，会造成地震共中心点道集内反射点之间分散性较大。这也是海上地震勘探工作中存在的特殊问题。为了减小电缆羽角的影响，测线应尽可能平行于海流的方向，并顶流上线施工；在可能条件下可适当增大船速以克服旁流影响。

海洋地震勘探也有静校正问题，由于震源与检波器的深度不同，需要校正，相比陆地地震勘探的静校正来说显得十分简单。另外在海洋地震勘探的施工区域内，当海底崎岖不平时，和陆地风化层校正类似，要做海底地形校正。

由于海水和海底面、海水和空气接触面是一个波阻抗差异很大的界面，因而产生了各种类型多次波。由于震源和检波器是在水下，因此还会产生激发和接收形成的虚反射（鬼





波)。如何在野外采集和资料处理中压制多次波也是海洋地震勘探的一大难点。

### 1.3 海洋地震勘探的主要新技术

当今全球的海洋油气勘探正面临着深水、深层、盐下等更为复杂的构造和岩性地层圈闭的挑战,对三维地震勘探数据的成像精度、分辨率、深层反射强度有更高的要求,常规拖缆三维地震勘探已经不能满足解决这些更为复杂的地质问题的需求。业界一直在装备技术、数据采集方法、导航定位、施工质量控制、数据处理方法等各方面进行技术研发与创新,科学与技术的不断融合支撑着当今海洋地震勘探技术的发展。

为适应新勘探形势下地震资料精确成像的要求,近些年来国际海洋石油地震勘探涌现出了许多新的资料采集与处理技术。在激发方式上,从平面震源发展到多层震源、立体震源;在接收方式上,从水平电缆接收发展到上一下缆和斜缆(变深度电缆)接收,从单一的压力型检波器电缆发展到速度和压力组合的双检波器电缆;在海洋三维地表勘探中,从直线航线的窄方位角数据采集发展到多船多源多缆宽方位数据采集和环形全方位数据采集;三维地震成像面元也由大面元发展到小面元。这些新地震采集技术的应用,有效地克服了海洋拖缆地震勘探的不足,增加了地震原始信号的低频能量,拓宽了有效地震频带,丰富了方位信息,提高了陡倾角地层、复杂断层、复杂断块的波场照明度,也提高了深部有效反射信号信噪比和成像效果与精度,从而满足了复杂油气田勘探、开发的需求。以下简要概述这些新技术及其特点。

#### 1.3.1 空气枪震源立体组合技术

海洋地震勘探普遍使用的震源是空气枪,也就是在极高的压力下将气体释放到水中的装置,是一种非炸药震源。由于单个空气枪在水中激发时,空气枪周围的水体会发生膨胀与收缩,产生振荡,导致很强的气泡效应。海上地震作业使用的空气枪震源采用单支枪为一个震源比较少,多用多枪组合的办法,形成一个有效抑制气泡效应的空气枪震源。采用调谐枪阵和相干枪阵两种方法来最大限度地提高震源能量和抑制气泡效应。不同容量单枪组合的枪阵激发后从某种程度上抑制了气泡效应,但是没有压制来自海面鬼波的影响。

为了降低气枪震源鬼波的影响,改善震源子波形态,受陆地垂直震源延迟激发压制虚反射的启发,有人提出了垂直震源法,也就是空气枪震源立体组合技术。将两个枪阵按炮间距前后布置并分别沉放于同一垂直平面内的不同深度,采集中两个枪阵交替激发形成同一激发位置上两个不同激发深度的单炮记录;处理中采用波场分离方法,剔除两个连续炮点记录的上行震源波场,减弱了震源产生的鬼波及陷波作用,提高了地震分辨率。

#### 1.3.2 拖缆上一下缆地震资料采集技术

海洋地震勘探是在勘探船航行中不停顿地接收地震波,海上地震检波器按照技术要求装配在电缆上,这种配置了海上地震检波器的电缆被称为海洋地震电缆,又称“拖缆”。为了在地震数据接收中保持电缆稳定的水下深度,在电缆的前部和尾部无检波器电缆段上附以适当的负荷,并用定深器实时调整和控制电缆,使整个电缆保持在水下某个固定的深度。



海上常规拖缆地震勘探方法有其严重的不足,由于鬼波的存在,接收点鬼波的陷波作用严重地影响到地震资料的频谱成分。鬼波作为下行波的一部分从海面向拖缆内的检波器传播,地震资料频谱通常在高频部分受到陷波影响。为有效削弱由海平面虚反射引起的陷波作用,利用在不同水下深度鬼波对不同频率的压制特性,采用拖缆上一下缆接收技术,用垂向上的两条拖缆进行数据接收,资料处理时将上行波和下行波进行分离。这种方法既有效地保留了上缆的高频信息又兼顾了下缆的低频信息,两套数据合并后提高了地震信号分辨率。由于增加了地震数据的叠加次数,也提高了地震信号的信噪比。

### 1.3.3 斜缆宽频地震资料采集技术

由于上一下缆地震资料采集要求严格控制电缆处于同一垂直面上,以确保接收点所获信息的均匀性和数据合并时反射点位置的一致性,对设备和作业海况的要求较高,常规地震勘探设备实施难度大。电缆变深度沉放(斜缆)技术,是一种施工相对简单的地震资料采集技术,只需将单条电缆按一定斜率或分段沉放于不同深度,使虚反射陷波效应分散化,在资料处理过程中可以容易地分离鬼波并加以压制,同时这种采集方式的原始资料低频信噪比很高,容易提升地震信号低频、达到拓宽频带、提高原始信号振幅能量和信噪比的目的。

### 1.3.4 拖缆双检地震资料采集技术

常规的海上地震资料采集方法不管是单缆还是多缆都是使用压力检波器接收地震波。拖缆双检地震资料采集技术是在传统的压力检波器之外增加了速度检波器,将它们集成于固体拖缆中。拖缆双检地震资料采集技术同时采用压电检波器和速度检波器接收,可以有效压制来自海水面的虚反射干扰。当来自地下的有效波相位一致时,两种检波器接收的来自海水面的虚反射波信号相位相差 $180^{\circ}$ ,通过匹配叠加即可消除海水面的鬼波,提高地震数据高频端的频率成分。由于这种双检拖缆施工时电缆沉放在水面下较深位置,低频成分显著增强,低频干扰小,有助于中深层勘探。采用双检电缆进行数据采集,通过数据合并处理,可有效地减弱由电缆沉放带来的鬼波效应对地震信号的高频段和低频段的损害,提高地震信号的信噪比和分辨率。

### 1.3.5 拖缆高密度地震资料采集技术

减小地下反射面元大小,提高空间采样率,是提高地震数据精确成像的重要手段,可大大提升资料的横向分辨率,我们把这一技术称之为高密度采集技术。该技术有两个显著特点:一是小尺度面元,保证足够的空间采样和面元属性均匀;二是接收道数多,可多达数千至数万道。

常规组合采集方法存在组内干扰等缺点,影响组合信号的精度。为此,单检波器高密度地震资料采集技术受到越来越广泛的关注,该技术采用单点接收、小道距、大道数的采集方式,在室内进行单道信号的一致性分析,做合理的组合处理,与常规组合勘探相比可以消除组内干扰,提高噪声压制的精度,提高地震资料的分辨率和成像精度,适应日益复杂的勘探目标的高精度要求。在国际上该技术的理论研究已经取得了许多进展,实际应用





效果也比较好。国内从 2000 年开始,也对该项技术开展研究,成功研制了海上单检高密度地震资料采集系统,并进行了海上勘探试验。

### 1.3.6 海上宽方位地震资料采集技术

地下地质体是三维的,也是各向异性的,应该由三维的地震波场数据描述地下地质体。但是海上常规拖缆地震资料采集方法是采用束线单边放炮方式施工,这就决定了这种采集的窄方位信息特征。面对地质勘探目标的复杂性和对地震勘探精度要求的不断提高,宽方位地震勘探已成为 21 世纪地震勘探技术发展的主流和方向。与陆上不同,海上宽方位地震资料采集成本相对较低,实现方式多样,因此起步较早,发展也较快。特别是近年来发展了多种海上宽方位地震资料采集技术,如拖缆宽方位、拖缆多方位、拖缆富方位、正交宽方位和螺旋式全方位等采集技术,对改善复杂构造成像、盐下成像和研究诸如裂缝这样的储层非均质性问题起到了极大的推动作用。

### 1.3.7 海底电缆(OBC)地震资料采集技术

近年来,由于中国近海石油矿区内钻井船、生产平台、浮式储油轮等生产设施越来越多,无法进行常规拖缆采集作业,往往只能采用海底电缆进行数据采集施工。现代海底电缆通常配置了双检波器(压力检波器和速度检波器),能够做多分量数据接收。这种装备可以在海陆过渡带、水深几米到 300 多米的海水环境下施工。海底电缆地震资料采集技术能够像陆地方式实施三维地震资料采集和宽方位地震资料采集,获得的转换波信息,更适用于裂缝性储层描述、油气检测和开发地震。海底电缆施工方式所采用的观测系统方便、灵活、多样,可以束状采集,也可以片状采集,根据地质要求和水面、水下的复杂情况灵活选用。该技术在中国近海地震勘探中得到了广泛应用。

### 1.3.8 海上导航定位技术

海洋地震船在海上从事地震勘探工作时,导航定位是十分重要的。早期的经纬仪、六分仪定位和三点交会原理的无线电定位系统完全不能满足当今海上地震勘探导航定位的需求,因此,近 20 年来普遍应用差分法全球卫星定位系统。为了适应多源多缆三维地震资料采集的需要,又发展了激光定位、水下声呐定位系统和相对 GPS 系统。为了适应海底电缆地震勘探技术施工,又发展了海底二次定位技术。现在海上地震勘探的导航定位已发展成一整套专门的技术,极大地提高了海上地震资料采集的定位精度,改进了地震资料采集的质量。



## 2 海上导航定位技术

海洋物探船在海上从事物探作业时，导航定位是十分重要的。没有高精度的导航定位设备和技术保证，所获得的地震资料会因为缺乏关于测线位置的数据而变得毫无价值。随着海洋地震勘探及 GPS 定位技术的快速发展，传统的海洋地震数据采集中的海上定位方式及导航数据处理技术逐渐成为了历史。现代海洋地震勘探中通常采用综合定位方法，即同时使用 DGPS、电罗经、磁罗盘、声学定位系统、激光跟踪系统和 RGPS 尾标跟踪系统构成综合定位网络。

### 2.1 导航定位技术简介

#### 2.1.1 导航定位技术的发展

海上导航定位有多种技术途径。古老的海上定位方法是利用六分仪观测天体或陆地标志来推算船位，称为天文定位或地物定位。这些方法所测定的船位误差往往超过 1nmile，不能保证海洋地质和地球物理测量的要求。现代的海上导航定位主要有无线电定位和卫星导航定位。近 20 年来普遍应用差分法全球卫星定位系统。为了适应多源多缆三维地震采集的需要，又发展了激光定位、水下声呐定位系统和参考 GPS 系统。现在海上地震勘探的导航定位已发展成一整套专门的技术，极大地提高了海上地震采集的定位精度，改进了地震采集的质量。

目前海洋地震勘探中，地震勘探船拖曳一条或多条电缆。随着枪阵激发，拖曳电缆采集地震波反射数据，船载定位设备采集导航定位数据。船载定位设备主要有 DPGS、RGPS、电罗经、测深仪等，枪阵定位设备主要有枪阵声学鸟、RGPS 等，拖曳电缆定位设备主要有头标、尾标、罗经鸟、声学鸟、深度传感器等。输出的数据主要有导航头段、枪控头段等，各设备数据通过综合导航系统数据采集平台发送给导航系统软件。

各设备的导航定位原始数据记录在原始导航数据文件中，以 UKOOA P2/94 格式存储，将 P2/94 格式的原始定位数据文件进行解算，解算后的定位数据以 P1/90 格式存储。勘探作业中导航定位设备及信号分布如图 2.1 所示。

导航定位系统测量原理如下：

- (1) 测量发射信号与接收信号之间的时差，计算距离（量程）；
- (2) 根据两次信号之间的时差，求出距离差；
- (3) 根据多普勒频移，测量频率差，计算船速；
- (4) 利用定向加速度计算出测量船的加速度；
- (5) 利用陀螺罗盘测量与正北方向的夹角。

已知船的速度与加速度，就可以用积分求出船的位置。

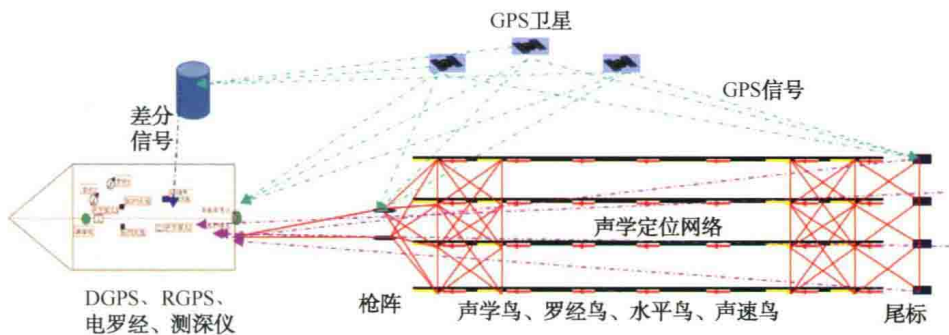


图 2.1 海洋地震勘探导航定位系统示意图

根据确定位置的方法，可以将导航系统分为：

- (1) 推算定位法：根据已知的位置推算现在的位置；
- (2) 船迹推算法：根据已知的起始点和航线推算现在的位置；
- (3) 天文测量法：根据在某一确定时刻太阳和星星的位置进行测量（卫星导航可以归为此类）。

我国曾经使用的高精度无线电定位系统，如赛里迪斯（SYLIDISE）、阿戈（ARGO）等，定位精度在米级到数十米级，能满足地震勘探普查的精度要求。但最大问题是覆盖距离及几何布台情况受到限制，无法保证中、远海域物探的精度要求。另外，需设置多个岸台，要花费大量的人力物力。这与 GPS 系统（全球定位系统）相比就大为逊色。采用 GPS 系统，无须布设岸台或只设一个伪岸台，经济效益是显而易见的；加上适当的数据处理技术，能够使 GPS 满足海上石油勘探的要求。

GPS 的空间部分是由 24 颗卫星组成（21 颗工作卫星，3 颗备用卫星），它位于距地表 20200km 的上空，均匀分布在 6 个轨道面上（每个轨道面 4 颗），轨道倾角为  $55^\circ$ 。卫星的分布使得在全球任何地方、任何时间都可观测到 4 颗以上的卫星，并能在卫星中预存导航信息；GPS 的卫星因为大气摩擦等问题，随着时间的推移，导航精度会逐渐降低。

海洋地震勘探对导航定位精度要求较高，尤其在三维地震勘探时要求更高。为了提高实时快速定位的精度，当前海洋地震勘探采用差分 GPS 定位。

差分 GPS 是在已知位置点上建立基准站，连续跟踪所有可见卫星进行定位，通过已知卫星位置，分别确定卫星星历误差、卫星钟误差、大气延迟误差等各种误差源所造成的影响，然后再设法把求得的误差修正值通过无线电数字链传送给物探船，物探船则采用适当方法对测量结果进行修正。

### 2.1.2 水下定位技术的发展

随着海洋地震勘探精度要求越来越高，仅仅对拖带船定位是不够的，需要对震源和检波点进行定位，需要发展水下定位系统。水下定位的发展也经历了几次历史性变革，即罗盘定位、三网络定位、全电缆声学网络定位。

在罗盘出现之前，我们无法确定检波点的位置，包括电缆羽角都是用雷达确定，三维勘探更是无从谈起。但是罗盘出现后，人们又提出新的问题，只有方位，距离都是理论的，怎么解决？这直接导致了声学、激光、RGPS 系统的出现。





### 2.1.2.1 罗盘的出现

20 世纪 60 年代, J. M. Lapeyre 发明了光学数字罗盘并于 1971 年成立了 DigiCourse 公司, 从此海洋拖缆地震勘探可以通过在电缆上安装深度控制和磁罗盘来控制电缆的深度、测量电缆上某点的方位, 这样操作员可以粗略模拟出电缆形状并对检波器进行定位。这之后, 二维地震勘探通过在电缆上加装深度控制和磁罗盘系统来控制电缆深度、测量电缆上一点的方位, 从而可以大概地推算出电缆形状和检波点位置。到目前为止, 罗盘仍然是常规拖缆地震勘探中不可缺少的定位设备。

光学数字罗盘的设计基于一块光学译码板, 该板以悬浮状态和磁铁共轴, 外壳固定在二极管灯阵和光电晶体管的万向轴总成上。当磁铁的指向发生变化时, 二极管灯阵和译码板的相对位置也发生变化, 不同 LED 光线的传播路径被光电晶体管阻挡, 这样就可以得到磁铁的方位, 其获得的方位分辨率可以达到  $0.3^\circ$ 。

由于采用了万向节设计, 光学罗盘在世界上任何可进行拖缆地震勘探的区域具有极强的一致性, 甚至在地球的极点也几乎一致。由于是光学设备, 光学罗盘的校准值在长时间内也是非常稳定的。

### 2.1.2.2 三网络定位

在 20 世纪 80 年代, 出现了一种新的拖缆地震勘探方法——双源双缆, 可以同时采集 4 条共中心点线, 大大提高了生产效率。随着多缆地震勘探的出现, 单独采用罗盘鸟进行精确定位明显不能满足要求, 这样引入了声学测距系统进行电缆前部定位和电缆形状估算。到 20 世纪 90 年代, 海上三维地震勘探越来越普及, 同时形成了典型的电缆前中后三网络定位模式 (图 2.2)。当时多数的物探公司采用这种方法进行水下电缆和震源的定位。

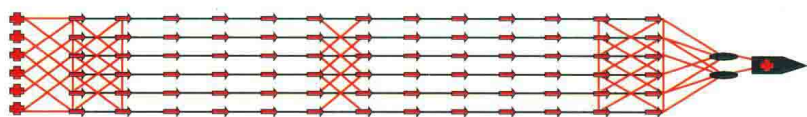


图 2.2 电缆前中后三网络定位示意图

### 2.1.2.3 全电缆声学定位网络

随着拖带电缆数量不断增加, 电缆长度也在不断增加, 石油公司对小型复杂构造和深部构造测量精度要求越来越高, 相应的定位精度的要求也越来越高。在 1997 年苏格兰举行的海洋测量大会上, Chris Walker 博士和 PGS 公司的 Jon Falkenberg 发表了一篇关于地震电缆声学定位的论文, 介绍了通过在整个电缆上安装声学设备, 把前中后三网络联系起来的方法, 这就是著名的全电缆声学定位方法 (图 2.3)。这种全电缆声学网络定位技术在高精度地震勘探中已经广泛采用。

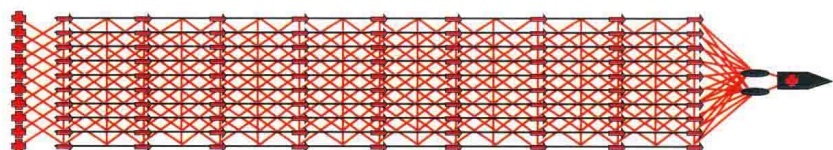


图 2.3 全电缆声学定位网络示意图

典型的三网络定位方法基于声学节点位置的估算精度。在距离 RGPS 较近的电缆前部