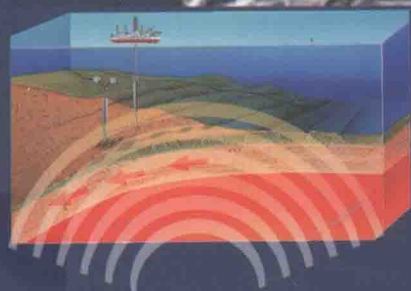


海上高精度 地震勘探技术

赵 伟 等编著



**Offshore High-Precision
Seismic Exploration
Technology**

石油工业出版社

海上高精度地震勘探技术

赵 伟 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

该书以海上高精度地震资料采集系统研制、高精度地震资料处理分析技术、高精度地震储层描述技术为基本内容,形成了一套海上高精度地震勘探技术。

本书可供海上地震勘探技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海上高精度地震勘探技术/赵伟等编著.
北京:石油工业出版社,2012.7

ISBN 978-7-5021-9096-5

I. 海…

II. 赵…

III. 地震勘探

IV. P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第111788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:北京晨旭印刷厂

2012年7月第1版 2012年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:32.75 插页:8

字数:860字

定价:168.00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 一

中国海上油气资源勘探近 50 年，海上地震勘探技术发展走过了艰难曲折的道路。20 世纪 60 年代到 80 年代，在一穷二白的艰难条件下，地球物理工作者自主创新，形成了第一代勘探装备和技术。从 20 世纪 80 年代起，在大规模合作勘探的背景下，形成了以技术引进为主导的技术发展模式，海上油气勘探迅速发展，但自主创新发展基本处于停滞状态。21 世纪初，我们逐渐意识到，引进的不完全是先进的，引进的是“受限”的，引进的是“昂贵”的，引进的不能很好地解决我国海上油气资源的勘探问题。

国家 863 计划自“九五”起对海上地震勘探技术发展进行了重点支持。本书是在总结“十五”863 课题“海上时移地震油藏监测技术”和“十一五”863 课题“深水高精度地震勘探技术”相关自主创新研究成果的基础上，系统凝练梳理，精心组织而成。它凝聚了国内该领域近百名专家学者近 10 年潜心钻研的心血和成果。

本书的内容以“高精度”地震勘探技术为核心，全面介绍了海上高精度地震采集装备、海上高精度地震处理技术和海上高精度地震解释技术研究成果，系统表述了海上高精度地震勘探技术的特征、技术组成和技术特点，构建了海上高精度地震勘探技术体系。以无组合单检波器、高密度空间采样和高精度电缆控制为核心的海上高精度地震拖缆采集装备，是目前国际上最先进的海上地震勘探装备；以高信噪比、高分辨率、高成像精度和高保真为目标的高精度地震处理技术，针对高精度地震资料的特点，由一批特色先进的去噪、压制多次波和鬼波、反褶积、能量补偿和叠前时间偏移等技术，构成了高精度地震资料处理技术方案和技术流程；以充分利用高精度地震资料优势和信息挖掘，提高地震储层研究水平为目标的高精度地震解释技术，基于先进的信号分析理论和信息融合理念，构成以岩石物理分析、边缘检测、频谱成像、分频、属性提取优化和弹性参数反演为核心的高精度地震解释技术方案和技术流程。

本书的出版将是中国海上油气资源勘探技术发展历史中的标志性事件，是彻底打破国外技术封锁和技术垄断的开始，是我国海洋地震勘探技术真正走向自主创新、自主发展的起点，是提高我国海上勘探水平的重要技术支撑。

中国科学院院士



2012 年 5 月

序 二

中国海洋石油工业于 20 世纪 60 年代初创,自中国海洋石油总公司 1982 年成立以来,我国海域油气勘探开发历经 30 年的高速发展,油气产量从成立之初的年产 9 万吨增长至 2010 年的 5000 万吨(油当量),成功建成了“海上大庆油田”,取得了令世人瞩目的成就。然而,随着我国海域油气勘探程度的不断提高,勘探的难度也不断加大,还面临着一系列重大的技术挑战。例如,近海陆相沉积储层薄、横向变化快;近海中深层地震资料信噪比低、分辨率低、成像差。此外,深水地震勘探也面临复杂海底地形影响、深层分辨率低和成像差、储层评价及流体检测可靠性差等难题。

地震勘探技术在海上油气资源勘探中扮演着极其重要的角色。但是,目前我们使用的关键装备和技术基本上属于技术引进,这些装备技术使用的成本高,有些设备在进口时就有许多技术限制,造成应用上的局限性。

中国海洋石油总公司在国家 863 计划的支持下,自 21 世纪初即开始了旨在发展具有自主知识产权、形成核心竞争能力的自主创新工作。在海上勘探技术研发中,以高精度地震勘探技术为核心,发展成套的地震装备和技术。经过 10 年的努力,在国家科技部、中国海洋石油总公司,以及各专业公司、研究部门的共同支持下,通过国内大专院校科研院所的积极参与和各相关领域专家学者的共同努力,逐步研发形成了一整套包括装备、处理、解释和配套软件系统的海上高精度地震技术体系。海上地震勘探采集装备与技术——“海亮”地震采集系统,采用了无组合单检波器、高精度模数转换、高速大容量数据传输、组合式并行数据采集记录等一系列先进技术,整体性能达到了国际先进水平。该系统先后于 2008 年、2010 年和 2012 年分别在南海和渤海实施现场试验,进行了二维、三维地震采集,获得良好数据,证明了系统的先进性。该系统已于 2008 年起,装备渤海 521 船投入工程勘察生产应用。海上高精度地震处理解释技术,以高信噪比、高分辨率、高成像精度、高保真、高可靠性和低多解性为研发目标,由近百项先进实用的技术集成,形成了中国海洋石油总公司具有自主知识产权的地震资料处理和综合解释软件系统,逐步在生产中应用。

中国海洋石油总公司于 2012 年提出了“二次跨越”的战略构想。“二次跨越”战略目标的实现必须依靠思维创新、技术创新、管理创新,迫切需要地质新认识和勘探新技术支撑勘探的可持续发展。而“海上高精度地震勘探技术”有望成为实现“二次跨越”勘探战略目标的重要技术支撑之一。

本书总结提炼了近 10 年该领域技术研发的成果,系统构建并阐述了海上高

精度地震技术。本书可以为海洋油气资源勘探研究工作者提供有益的帮助，并有助于推动海上油气勘探研究水平和勘探进程。

中国海洋石油总公司总地质师 乐伟华

2012 年 5 月

前言

海洋石油勘探开发经过 20 多年的对外合作及自营,得到了飞速发展,并进入一个高速发展时期。目前,地震勘探技术成为油气勘探的主要手段和贡献率最高的技术。但是,随着勘探难度的不断加大,海上油气勘探开发正面临着新形势和新任务:由简单构造油气藏向复杂构造油气藏的转移;从构造油气藏向地层、岩性等隐蔽油气藏的转移;从浅、中层目标向深层目标的转移;从浅海领域向深水领域的转移等。同时,我国海域勘探开发存在众多重大难题。这对地球物理技术提出了更高的要求。

东海盆地油气勘探面临诸多的挑战,对地球物理技术而言,地震资料品质问题一直是困扰勘探的关键因素之一。丽水凹陷中、深部目的层反射弱、多次波干扰严重,西湖凹陷基底反射不明显等,针对高分辨率地震勘探、多次波压制、低幅构造 3D 地震速度场建立、地震反演区分砂泥岩技术等问题攻关,进一步优化东海陆架盆地各地质单元地震采集、处理参数,提高地震采集、处理资料质量,形成针对东海盆地多次波发育特征、具有区域特点的采集、处理技术,以及在“高信噪比、高分辨率、高保真”资料基础上的精细储层预测技术,降低解释、评价风险,是东海油气勘探走向精确勘探的必由之路。

在渤海,经过多年积累,对于以构造为主控因素、以砂岩为储层的油气藏的勘探开发,形成了一套行之有效的技术方法,取得了辉煌的成就。传统的地震资料处理方法解决了构造问题,研究了大量技术和积累了丰富经验,支持了油气勘探开发,取得了巨大的成功。但渤海地区油气产量的进一步提升,勘探方向要从以构造油藏为主逐渐向隐蔽性油藏过渡,勘探的难度也越来越大。同时渤海湾盆地断层复杂,储层横向变化快,提高现有油田的采收率和产量是开发面临的重大难题。随着勘探开发程度的提高,对地球物理勘探提出了直接的挑战,要求进一步提高地震资料时间和空间的分辨能力,在已经明确的砂岩富积区内细化物性变化,预测所圈定的砂岩体内的流体,精细描述复杂的断层发育带,有效地识别隐蔽圈闭。

莺—琼盆地是海上天然气勘探主战场,通过多年来的研究与实践,认为适于莺—琼盆地非经典陆架陆坡层序模式下隐蔽气藏的特色地质模式与配套技术系列,可以为莺—琼盆地下一步隐蔽气藏的勘探奠定理论基础和技术储备。基于岩石物理研究和模拟技术、地震动力学参数、运动学参数,以及反演的 AVO 属性、声阻抗属性的精化和量化等提高油气检测技术的成功率是关键所在,这些都对地球物理勘探资料的品质提出了更高的要求。

珠江口盆地经过 20 多年来的勘探开发,在地质储量和天然气产量方面取得

了很好的成绩。但现有发现的油藏类型单一，几乎全是背斜油藏。近几年在珠江口盆地珠一凹陷古近系发现油气田和大量油气显示，因此寻找复式油气聚集带成为主攻目标。但根据不同富油气凹陷的地质特点和成油条件评价出重点的复式油气聚集带，对有利的复式油气聚集带实行整体解剖，不可能像陆上打那么多井，只有坚持地震先行，寻找富层、富块，才能高效地发现新的储量。这些对地球物理勘探技术提出了更高的要求。

上述海上油气勘探开发问题对地震勘探技术提出了新的要求，发展地震勘探新技术以满足油气勘探开发需要显得十分迫切。

为此，“十一五”期间，国家高技术研究发展计划（863 计划）设立重点项目“深水高精度地震勘探技术”（2006AA09A102），开展海上高精度地震勘探技术研究。项目由中国海洋石油总公司组织，具体由中海石油研究中心承担，联合中海油田服务股份有限公司、中国科技大学、中国科学院声学研究所、清华大学、中国科学院地质与地球物理所、中国石油大学、西安交通大学、中船重工集团 710 和 715 研究所等高校与研究院所的研究力量共同完成项目的研发工作。

课题的研究目标：研制海上拖缆稳态控制与高精度定位技术，无组合单点高密度检波器拖缆，大容量高速实时地震记录等技术，形成一套海上高精度地震数据采集系统；研究有效去噪、振幅补偿和高保真叠前道集的合成处理，地层层序结构成像和储层预测及流体检测等关键技术，形成高精度地震海量数据和复杂计算的并行处理技术，以及高精度地震资料处理解释技术体系。

通过 5 年多的研究，在下列几方面开展工作并取得了重要研究成果：

建立和完善了基于高密度空间采样、高精度电缆定位、无组合单点检波器和标定震源的海上拖缆高精度地震采集系统和采集施工方法。

通过岩石物理实验、理论模型研究，利用基于照明分析的观测系统设计技术，对复杂介质地震波衰减和多次波耦合等特征分析，为高密度数据采集、高保真处理、解释研究提供基础。

在对现行地震数据处理技术与流程适应性分析的基础上，通过研究去噪、振幅补偿、成像和高保真叠前道集的合成与处理等关键技术，形成了高精度地震处理技术体系。

基于高保真地震处理资料，以地质目标为对象，研究叠前叠后联合的地震属性分析和地质综合解释分析技术，形成了高精度地层层序及特征成像技术与分析流程。

大幅度提升 MPS（海上地震资料并行处理系统）的性能，满足了海量数据处理要求，建立了地震资料处理网格计算基础平台。

本书就是该项目研究的全面总结与提升，以海上高精度地震资料采集系统研制、高精度地震资料处理分析技术、高精度地震储层描述技术为基本内容，

提炼了5年多来项目组的主要研究成果，在课题结题之际，呈现给长期以来关心、帮助和支持海洋地震勘探技术发展的领导、专家和学者。

本书由赵伟提出编写思路和组织编写。根据中海石油研究总院、中海油田服务股份有限公司、中国科技大学、中国科学院声学研究所、清华大学、中船重工710和715研究所等单位专家学者提供的海上高精度地震资料采集系统研制部分的研究报告，清华大学、中国科学院地质与地球物理所、中国石油大学等单位专家学者的高精度地震资料处理分析技术部分的研究报告和中国石油大学、西安交通大学等单位专家学者完成的高精度地震储层描述技术的研究报告为基础，由赵伟、翁斌、陈小宏、李景叶、王守东等同志编写完成。

本书的编写得到了中国海洋石油总公司朱伟林总地质师，中海石油研究总院陈伟院长、王志君副院长、李绪宣地球物理总师等领导专家和专家的大力支持和帮助。中国科学院院士刘光鼎先生专门为本书撰写了序。笔者对上述领导和专家的指导和帮助表示衷心的感谢！

由于笔者水平所限，书中可能存在许多不足之处，敬请读者批评指正！

目 录

采集设备篇

1 海上高精度地震数据采集设备概述	3
1.1 国外海洋地震勘探装备技术现状	3
1.2 国内海洋地震勘探装备技术现状	3
1.3 发展海洋勘探装备技术的重要意义	3
1.4 高精度采集系统关键性技术	4
1.5 国内高精度采集技术研发取得的最新进展	5
2 海上高精度拖缆采集系统	8
2.1 四缆采集记录系统	8
2.2 十六缆采集记录系统	21
2.3 主控与记录软件系统	23
2.4 水下数据采集与传输系统	28
2.5 水下拖缆设计与成缆	33
3 拖缆水平控制系统	40
3.1 拖缆水平控制系统组成	40
3.2 工作原理	40
3.3 拖缆水平控制装置方案设计	41
3.4 综合控制台	64
3.5 船上通信控制平台设计方案	66
4 全网声学定位系统	69
4.1 声学定位系统及其原理	69
4.2 声学测距节点工作原理	71
4.3 声学测距节点详细设计	72
4.4 节点相关部件研制	87
4.5 软件设计	90
4.6 通信控制机详细设计	100
5 光纤检波器及成缆技术	106
5.1 光纤检波器制作技术	106
5.2 光纤检波器解调技术	115
5.3 光纤检波器测试技术	128
5.4 光纤检波器拖缆成缆技术	131
5.5 光纤检波器拖缆测试技术	137

6 海上高精度地震采集系统海试	140
6.1 海试概况	140
6.2 设备海试情况总结与分析	142
6.3 海试总结	147

处理技术篇

7 高精度地震资料处理技术概述	151
7.1 高精度地震资料处理技术需求分析	151
7.2 高精度地震资料处理技术研究现状	152
7.3 海上高精度地震处理技术研发进展	155
8 高精度地震资料特征	156
8.1 高精度地震资料优势与处理难点	156
8.2 模拟高密度地震数据分析	157
8.3 实际高密度地震数据及噪声分析	161
8.4 高密度地震资料处理方法、流程适应性分析	165
9 高精度地震去噪处理技术	176
9.1 基于径向道变换噪声压制技术	176
9.2 自适应涌浪噪声衰减技术	179
9.3 基于速度滤波的线性噪声压制技术	183
9.4 多维多空间去噪技术	185
9.5 保边缘去噪技术	190
9.6 高密度地震室内数字组合技术	195
10 高精度多次波预测及压制技术	207
10.1 基于非高斯性最大化的预测反褶积技术	207
10.2 $\tau-p$ 域预测反褶积多次波压制技术	210
10.3 基于非高斯性最大化的鬼波压制技术	214
10.4 基于速度滤波的多次波消除技术	217
10.5 SRME 方法压制多次波技术	221
10.6 基于 ICA 的多次波自适应相减技术	224
10.7 基于高阶统计量的多次波自适应相减技术	228
11 高精度地震振幅补偿及提高分辨率处理技术	232
11.1 有效信号衰减及补偿方法	232
11.2 相对保幅高分辨处理技术	246
11.3 基于匹配滤波的高分辨率处理技术	257
11.4 角度域拉伸校正和相位校正技术	259
12 高精度地震资料偏移成像技术	270
12.1 共角度道集的真振幅叠前时间偏移方法	270
12.2 各向同性叠前时间偏移技术	280

12.3	各向异性叠前时间偏移技术·····	291
12.4	黏弹性叠前时间偏移技术·····	303
13	实际高精度地震资料处理试验·····	314
13.1	W 区二维高密度地震资料处理及分析 ·····	314
13.2	工程地震资料处理试验·····	326

储层特征分析篇

14	高精度地震储层描述技术概述·····	331
14.1	高精度地震储层描述技术需求分析·····	331
14.2	高精度地震储层描述技术研究现状·····	331
15	高精度岩石物理分析技术·····	334
15.1	影响岩石衰减的主要因素·····	334
15.2	岩石衰减的岩石物理论·····	337
15.3	岩石衰减参数的计算方法·····	344
15.4	流体对岩石物理弹性参数的影响·····	345
16	高精度地震属性分析技术·····	367
16.1	高精度地震资料沉积旋回分析技术·····	367
16.2	高精度层序检测技术·····	372
16.3	地质体横向边界的检测技术·····	374
16.4	基于超道和 C3 的地震相干分析技术 ·····	379
16.5	基于高阶统计量的地震相干分析技术·····	385
16.6	海上高精度地震资料频谱成像技术·····	389
16.7	海上高精度宽频带地震资料瞬时属性分析技术·····	394
16.8	瞬时地震子波估计地震属性分析技术·····	409
16.9	基于 RS 的属性优化决策方法研究 ·····	412
16.10	基于 FSOM 的属性聚类分析方法研究 ·····	418
16.11	基于 RGB 的属性融合分析方法研究 ·····	424
16.12	基于地震相约束的地震属性定量预测方法 ·····	433
17	拉梅系数叠前反演技术·····	437
17.1	叠前同步拟测井曲线反演·····	437
17.2	叠前拉梅参数反演·····	443
18	全频带信息挖掘技术·····	459
18.1	地震全频带时频数据集的构建与开发·····	459
18.2	全频带地震信息在储层结构分析与成像中的应用·····	468
18.3	基于全频带地震信息集的几个属性·····	474
18.4	全频带地震信息集的数据融合·····	481
19	高精度储层预测技术综合应用·····	486
19.1	油田基本概况·····	486

19.2	资料基础.....	486
19.3	技术方案.....	488
19.4	技术应用效果分析.....	489
后记.....		500
参考文献.....		502

采集设备篇

1 海上高精度地震数据采集设备概述

1.1 国外海洋地震勘探装备技术现状

目前,国际海上拖缆地震勘探仪器厂商主要有法国的 Sercel 公司和美国的 I/O 公司。近年来,斯伦贝谢公司也在拖缆勘探设备研制方面取得了长足发展。这些公司资金、技术力量雄厚,市场竞争能力强,在海上拖缆地震勘探装备领域处于主导地位。

Sercel 公司的海上拖缆地震采集系统结构简便,可靠性稳定性高,故障率低,其主推产品是 SEAL 拖缆地震数据采集系统和 SYNTRON 拖缆地震数据采集系统。I/O 公司的主要产品是 MSX 拖缆地震数据采集系统, DigiCourse 拖缆控制、定位系统,气枪及震源控制系统。斯伦贝谢公司的单检小道距的 Q-Marine 拖缆地震数据采集系统,集成了拖缆控制定位,在高分辨率高精度海洋勘探设备中处于领先地位。固体电缆作为未来海上地震拖缆的发展趋势,上述公司均在固体拖缆方面投入了大量的研究。

目前,全球海上物探船配备的拖缆地震数据采集系统主要有 Sercel 公司的 SEAL 系统和 SYNTRAK 960-24™ 系统, I/O 公司的 MSX™ 系统,斯伦贝谢公司的 Q-Marine 系统;拖缆控制定位系统主要是 I/O 公司的 DigiCourse 系统。

1.2 国内海洋地震勘探装备技术现状

国内西安石油仪器总厂进行过“九五”“863”海上多分量地震勘探仪器装备的开发研究,中船重工集团第 715 研究所等多家单位长期从事压电换能器的研究工作,有丰硕的成果,国内的压电陶瓷检波器技术已比较成熟。中海油田服务股份有限公司进行过一些海上拖缆成缆材料的国产化研究工作,但这些并没有改变国内海上地震勘探行业严重依赖进口仪器设备的现状。

目前国内从事海上地震勘探作业的主要有中海油田服务股份有限公司物探事业部所属的 6 艘物探船和广州海洋地质调查局所属的 4 艘物探船,主要进行常规海上二维、三维地震数据采集。这些物探船配备的拖缆地震采集系统主要购买自法国 Sercel 公司和美国 I/O 公司,其中以 Sercel 公司的产品居多。

1.3 发展海洋勘探装备技术的重要意义

首先,国外地震勘探仪器厂商对我国进口仪器设备进行技术限制,小于 12.5m 道距的拖缆地震数据采集系统禁止向中国出口,妨碍了国内海上高分辨率地震勘探的发展,不利于

国内油田深度精细开发和海上隐蔽油气藏的发现；同时进口设备存在价格昂贵，维修比较困难，备件采办周期长，进行大量的设备备件储备需消耗额外的维护费用等问题，增加了海上地震勘探的作业成本。

地震数据采集技术的进步可分为效率的提高（成本下降）或分辨率的提高（价值的提高）。分辨率的提高和成本的降低都是由数据采集开始的。如果直接面向地震数据采集的研究资金有限，降低成本在短期会产生效果；但是，通过加速地震数据采集装备技术的革新，不断地提高地震数据的分辨率将会获得长期的效益。因此开展海上高精度地震勘探仪器装备技术研究具有重大的战略意义和现实意义：

- (1) 有利于技术储备，形成具有自主知识产权的国产海上勘探仪器装备；
- (2) 突破国外地震勘探仪器厂商对我国高精度勘探仪器装备领域的技术封锁，提高国内海上高分辨率勘探能力；
- (3) 降低海上地震勘探成本，增强国内海上地震勘探企业的市场竞争能力；
- (4) 地震勘探仪器研发将推动相关领域的技术发展。

海上高精度地震勘探仪器装备国产化将提升我国海洋油气藏开发的能力，特别是对复杂地层和隐蔽油气藏的勘探开发能力，全面提升海上油气资源地震勘探技术水平，更有效地解决海上油气开发生产中精细构造解释、储层描述和油气检测的精度问题，为深水勘探战略提供强有力的技术支撑，有利于充分开发蓝色国土，缓解我国能源短缺的压力。

1.4 高精度采集系统关键性技术

获取高精度高分辨率三维海上地震勘探资料，根本在于研制高精度的海上地震勘探拖缆采集系统和高精度的拖缆控制定位系统，提高仪器系统的动态范围，改进勘探拖缆的结构设计，减小组合检波模式对高频资料的损失，增强采集系统的传输记录能力，增大采样率，实现 0.5ms、0.25ms 采样，提高采集资料中高频弱信号的信噪比。一系列拖缆采集系统的关键性技术可以确保拖缆系统在数据采集、记录过程中满足高分辨率、高采样率、高传输速率、实时性以及可靠性等要求，这些关键性技术是：

- (1) 长距离电缆的高速数据传输技术。基于电缆均衡器的高速数据传输技术，在 120m 差分双绞线上实现了至少 288Mbps 的高速数据传输。
- (2) 海量数据汇聚存储技术。为了针对海量的数据的传输、存储，在设计中利用高速数字串行总线（Infiniband 7，Fiber Channel）等技术。
- (3) 高速数据传输中的可靠性提升技术。在水下拖缆系统的数据传输中，使用了多种技术来提高传输可靠性。具体包括：修改传输协议定义，增加帧头帧尾标识，通过使用数据驱动型的数据传输技术减少了各个数据帧之间的相关性，避免了数据传输中的偶发错误造成的