

# 多波高精度匹配理论与实践



程冰洁 唐建明 徐天吉 马昭军 编著



科学出版社

# 多波高精度匹配理论与实践

程冰洁 唐建明 徐天吉 马昭军 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书从介绍多波地震传播机理出发,全面阐述纵波与转换横波匹配的影响因素、匹配条件、高精度自动匹配方法及其实现流程等内容,系统论述纵波与转换横波匹配技术存在的问题、发展趋势及最新进展,并结合三维三分量地震勘探实际案例,详细分析纵波与转换横波实际地震资料的匹配思路、匹配效果和匹配数据的综合应用方法,进一步展现三维三分量地震技术在油气勘探开发中的应用潜力。

本书由浅入深介绍多波地震传播理论、纵波与转换横波的高精度匹配方法及实践效果,可供从事油气勘探研究、教学和开发的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

多波高精度匹配理论与实践/程冰洁等编著. —北京:科学出版社, 2014. 5

(油气藏地质及开发工程丛书)

ISBN 978-7-03-040364-3

I. ①多… II. ①程… III. ①地震波-应用-油气勘探-研究 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第067568号

责任编辑:杨 岭 黄 桥 / 责任校对:张怡君

责任印制:余少力 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



\*

2014年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年4月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:300 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

从 20 世纪 80 年代至今，我专注于多波多分量地震技术研究已逾 30 年。在复杂油气藏转换波成像、真假“亮点”判别、含油气地震识别、裂缝检测等方面的应用，见识过很多成功案例。中国在低渗透-致密油气、非常规页岩油气等领域，资源丰富、勘探开发潜力巨大；但面临不断累积的地质问题和勘探技术挑战，越来越多的复杂地质目标需要多波地震技术发挥特殊作用。

多波地震技术通过纵波或横波震源激发，利用数字检波器接收多分量地震数据，基于多种矢量波场提供的丰富信息开展地质体空间成像、储层岩性与含油气性识别、流体辨别、裂缝检测等地质应用。尽管保持矢量波场特征的多分量地震资料处理和解释过程难度较大，成本也相对略高，但终究提供了相比常规纵波勘探更丰富和精度更高的地震数据，显然更有益于地质信息的捕捉。无论是速度、走时、振幅、能量、频率、相位、波形等各种动力学、运动学和几何学属性参数，还是基于多波联合反演获取的纵横波阻抗、纵横波速度、密度、泊松比、体积模量、剪切模量、杨氏模量、拉梅系数、品质因子及基于多波方位数据体的纵横波时差、各向异性参数、横波分裂信息等，均有利于突出与油气藏密切相关的地质结构、物源走向、岩性展布、非均质体空间分布等特征，能够进一步提高烃源岩、储层、盖层等油气系统的描述精度，进而提高勘探开发钻井成功率。

然而，要充分发挥多波地震技术的特殊功效，纵波与横波的匹配处理不可忽视。它是多波地震资料对比解释与综合应用的基础，也是决定纵波与横波联合应用并在勘探开发中发挥重要作用的关键环节。但是，在地球科学领域，专门针对纵横波匹配研究的文献却并不多。《多波高精度匹配理论与实践》针对纵横波匹配处理问题，从介绍多波地震基础理论出发，客观地论述了当前纵波与转换横波匹配技术现状、发展趋势及最新进展，循序渐进地阐述了纵横波匹配的影响因素、匹配时需要满足的条件及高精度自动匹配方法与实现流程，详细地列举了三维三分量地震勘探中多波匹配处理案例，介绍了实际多波地震资料的匹配思路、匹配效果和匹配数据的综合应用效果，展示了多波地震技术在油气勘探开发中的应用潜力。

总之，随着多波采集技术和处理能力的飞速发展，多波地震技术必将成为资源勘查的重要选项，尤其在石油与天然气勘探、矿产勘查等领域具有广阔的应用前景。当前，无论是陆上二维三分量（2D3C）、三维三分量（3D3C）地震勘探，还是海上二维四分量（2D4C）、三维四分量（3D4C）等多波地震勘探，均面临着纵横波匹配问题。《多波高精度匹配理论与实践》专业特色十分明显、针对性与系统性较强、方法技术阐述清晰、理论与实例有机结合，能为领域内相关人员提供较好借鉴，在推动学科进步、油气

勘探开发新技术发展等方面具有重要意义。

特作此序。

英国地质调查局各向异性研究室 李向阳教授

Edinburgh Anisotropy Project, The British Geological Survey, Pro. Xiang-Yang Li



# 前 言

本世纪以来,在日趋复杂的油气勘探开发需求下,多波多分量地震勘探理论研究、技术试验和工业化生产应用规模等均呈现迅速的发展势头。目前,各大油气公司、科研院所和高等院校,针对多波地震勘探技术开展了大量的科技攻关,使该技术在岩性油气藏、隐蔽性油气藏、非常规油气藏等领域的应用前景更趋明朗。

然而,要充分利用多波多分量地震资料提取纵横波速度比、振幅比、纵横波阻抗、泊松比、体积模量、剪切模量、拉梅系数等岩性、物性敏感参数,实现储层预测、裂缝检测及流体识别等目标,高精度的多波匹配数据是至关重要的基础资料。因此,在纵横波联合属性提取、纵横波叠前/叠后同时反演等综合应用之前,需要首先解决纵横波匹配问题。

在归纳和研究前人匹配方法的研究基础上,本书基于陆地三维三分量地震资料,提出了以纵波叠前反演横波、利用横波间接实现转换横波匹配的新思路,打破了传统上采用纵波直接匹配转换横波的常规思路,力图解决制约多波后期应用的“瓶颈”问题,为形成多波高精度匹配新方法、新流程,并获得更好的综合应用效果奠定坚实的基础。

本书共分5章。其中,第1、2章主要由程冰洁撰写;第3、4章主要由唐建明撰写;第5章主要由徐天吉、马昭军撰写;统稿、审校等工作由程冰洁完成。

第1章:概述研究纵波与转换横波匹配方法的意义及多波多分量地震勘探技术现状、存在的问题和发展趋势。

第2章:重点阐述如何基于反射率法、波动方程法等技术手段研究多波传播机理,并以实际地质、地震、测井等资料为基础,详细分析多波在正演数值模型中的传播特性。

第3章:详细地阐述了基于纵波地震数据反演横波的理论及实现方法,对比分析了纵波、反演横波和转换横波等地震波的运动学、动力学及几何学特征,归纳总结了影响纵横波匹配的关键因素。

第4章:从纵横波匹配的基本原理出发,阐述纵横波速度比非线性反演方法、纵横波层位控制自动匹配方法、相位校正方法及理论数据效果分析等。

第5章:以川西XC地区三维三分量地震数据为基础,详细介绍纵波与转换横波的匹配处理过程、匹配精度分析及匹配数据的实际应用效果等。

结束语部分:归纳总结理论方法及实际运用中获得的认识,评价技术潜力、发展趋势,并提出应用建议。

总之,本书既对前人研究进行了概括论述,也归纳了相关研究人员多年以来的研究成果和实践经验。受多波理论与技术发展现状、作者研究水平等因素限制,书中可能尚有疏漏与不妥之处,敬请广大读者批评指正。



# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                     | 1  |
| 1.1 多波高精度匹配的研究意义             | 1  |
| 1.2 多波多分量地震勘探现状及存在的问题        | 1  |
| 1.3 多波匹配技术研究现状及存在的问题         | 7  |
| 第 2 章 多波地震波场传播特征             | 11 |
| 2.1 基于反射率法的多波波场数值模拟          | 11 |
| 2.2 基于波动方程的多波波场数值模拟          | 15 |
| 2.3 多波地震波场数值模拟实例             | 18 |
| 2.4 多波地震波场传播特征分析             | 22 |
| 2.4.1 PP 波与 PS 波的振幅或能量       | 22 |
| 2.4.2 PP 波与 PS 波的频谱          | 23 |
| 2.4.3 PP 波与 PS 波的波形和相位       | 24 |
| 第 3 章 多波高精度匹配理论基础            | 27 |
| 3.1 基于纵波叠前数据反演横波的理论          | 27 |
| 3.1.1 Zoeppritz 方程及 PP 波近似公式 | 27 |
| 3.1.2 基于纵波反演横波的方法            | 34 |
| 3.2 横波与转换横波之间的关系             | 39 |
| 3.2.1 PS 波近似公式               | 39 |
| 3.2.2 合成地震记录分析               | 42 |
| 3.3 基于纵波数据反演横波的实现流程及效果       | 46 |
| 3.3.1 实现流程                   | 46 |
| 3.3.2 利用纵波实测数据反演横波           | 46 |
| 3.4 纵波与转换横波之间的关系             | 48 |
| 3.4.1 PP 波与 PS 波 AVO 理论基础    | 49 |
| 3.4.2 PP 波与 PS 波的传播时差        | 49 |
| 3.4.3 PP 波与 PS 波的极性          | 49 |
| 3.4.4 PP 波与 PS 波振幅、相位        | 56 |
| 3.5 反演横波和转换横波之间的关系           | 60 |
| 3.5.1 PPS 波与 PS 波传播时差关系      | 60 |
| 3.5.2 PPS 波与 PS 波极性关系        | 60 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 3.5.3 PPS波与PS波动力学关系 .....       | 62         |
| 3.6 影响纵横波匹配的因素 .....            | 63         |
| 3.6.1 纵横波速度比 .....              | 63         |
| 3.6.2 子波相位 .....                | 64         |
| 3.6.3 振幅、频率 .....               | 66         |
| <b>第4章 纵波与转换横波高精度匹配方法 .....</b> | <b>69</b>  |
| 4.1 纵横波匹配基本原理 .....             | 69         |
| 4.1.1 多波地震勘探中的纵波与转换横波地震资料 ..... | 69         |
| 4.1.2 纵波与转换横波地震资料的时间关系 .....    | 69         |
| 4.1.3 纵波与转换横波地震资料匹配的基本原理 .....  | 70         |
| 4.2 层位控制自动匹配方法 .....            | 70         |
| 4.2.1 层位解释 .....                | 70         |
| 4.2.2 基于层位建立初始速度比模型 .....       | 70         |
| 4.2.3 纵横波初步匹配 .....             | 72         |
| 4.2.4 时移相关谱 .....               | 73         |
| 4.2.5 自动拾取时移相关谱 .....           | 73         |
| 4.3 纵横波速度比非线性反演方法 .....         | 77         |
| 4.3.1 非线性混沌优化反演方法 .....         | 77         |
| 4.3.2 纵横波速度比的非线性混沌优化反演 .....    | 80         |
| 4.4 时差分析法同相轴匹配 .....            | 88         |
| 4.4.1 方法原理 .....                | 88         |
| 4.4.2 模型分析 .....                | 88         |
| 4.5 纵横波相位校正方法 .....             | 93         |
| 4.5.1 相位校正方法概述 .....            | 93         |
| 4.5.2 地震信号零相位化 .....            | 95         |
| 4.5.3 地震子波提取方法 .....            | 95         |
| 4.5.4 分频相位校正方法 .....            | 96         |
| 4.6 纵波与转换横波高精度匹配流程 .....        | 99         |
| <b>第5章 多波高精度匹配技术实践 .....</b>    | <b>101</b> |
| 5.1 工区概述 .....                  | 101        |
| 5.1.1 工区多波多分量地震勘探背景 .....       | 101        |
| 5.1.2 储层地质特征 .....              | 103        |
| 5.1.3 储层地球物理响应特征 .....          | 107        |
| 5.2 纵波叠前反演横波 .....              | 113        |



---

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 5.2.1 纵横波标志性地层 .....            | 113 |
| 5.2.2 基于纵波地震数据叠前反演横波 .....      | 116 |
| 5.3 纵波与转换横波高精度匹配 .....          | 121 |
| 5.3.1 计算纵横波速度比 .....            | 121 |
| 5.3.2 时间匹配 .....                | 129 |
| 5.3.3 频率匹配 .....                | 130 |
| 5.3.4 相位校正 .....                | 136 |
| 5.3.5 高精度匹配效果分析 .....           | 136 |
| 5.4 纵横波叠后同时联合反演 .....           | 146 |
| 5.4.1 纵横波叠后同时联合反演方法概述 .....     | 146 |
| 5.4.2 基于高精度纵横波匹配数据的叠后联合反演 ..... | 149 |
| 5.5 纵横波匹配数据的地震属性 .....          | 156 |
| 5.5.1 瞬时振幅属性 .....              | 157 |
| 5.5.2 分频能量属性 .....              | 157 |
| 5.5.3 相干属性 .....                | 158 |
| 5.5.4 曲率属性 .....                | 159 |
| 5.5.5 吸收属性 .....                | 160 |
| 结束语 .....                       | 163 |
| 符号或术语说明 .....                   | 165 |
| 参考文献 .....                      | 166 |
| 索引 .....                        | 171 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 多波高精度匹配的研究意义

面对当前复杂的油气勘探开发需求,常规的纵波地震勘探技术存在诸多难以解决的问题。例如,真假亮点的甄别、气烟囱内部成像、储层裂缝发育程度与方位的分析、储层岩性预测、流体的辨识等。多波多分量地震勘探技术通过纵波或横波波场激发,采用多分量数字检波器接收,能够采集到比常规纵波勘探更加丰富的地震波场信息。这样,能够充分利用多波多分量资料的走时、振幅、速度及纵横波之间的时差、振幅比、速度比、泊松比、品质因子  $Q$  和各向异性参数,对油气藏的几何形态、岩石物性和流体性质等进行更为精确的成像与描述,最大限度地消除利用单一纵波进行储层预测的非唯一性。国际上的相关研究成果表明,纵横波地震资料联合解释技术可以提高储层参数预测精度达一倍以上。

多波地震勘探是进行岩性油气藏和隐蔽油气藏勘探的一种非常有潜力的手段。其主要应用范围包括:气云屏蔽、岩性屏蔽成像,裂缝预测、砂泥岩储层预测和流体识别等。虽然全球多波多分量地震勘探技术研究和实际应用取得了长足的进步,在多波勘探和各向异性介质波动理论研究和资料处理技术研究方面取得了大量研究成果,且在一些海上的多分量勘探项目中也见到了良好的勘探效果。但是,由于诸多原因,多波多分量理论研究和油气田实际勘探地质需求的结合问题、复杂条件下的转换横波地震资料处理问题和多波综合解释、全波属性的地质应用等问题一直没有取得显著进展,并且已经成为制约多波地震勘探技术进一步发展的“瓶颈”。而解决这些问题的基础是做好多波多分量资料处理,提供高品质的各向同性和各向异性处理成果。其中,多波传播机理的基础研究、多波资料中的纵横波匹配方法研究,是目前多波地震资料后续处理的重点和难点,也是多波精确成像和叠前纵横波联合反演及岩性识别、储层预测和含气性识别的重要基础,还是体现多波多分量地震勘探技术实际勘探开发应用价值的关键。

因此,基于多波传播机理,研究纵波与转换横波高精度的匹配新方法,有利于充分利用多波多分量地震资料、准确认识多波地质响应特征,突出多波多分量地震资料解决地质问题的能力,提高储层预测、裂缝检测、油气识别的可靠性,对我国大面积的致密裂缝性油气藏的勘探开发具有非常重要的意义。

## 1.2 多波多分量地震勘探现状及存在的问题

### 1. 发展历程简述

#### 1) 国外发展概况

多波地震技术历史悠久。泊松于 1828 年从弹性体运动方程中推证出了横波, Old-

ham 于 1897 年在天然地震信号中证实了横波的存在, Love 于 1911 年提出了另一类面波 (Love 波)。逐渐地, 多波地震技术开始进入研究与实际应用中。20 世纪 30 年代, 苏联首先进行 P-SV 转换横波的研究, 在这方面贝尔宗和她的学生作出了重大贡献。由于转换横波的处理比较复杂, 苏联在 1982 年提出了非对称观测系统以解决共反射点叠加问题。在横波震源问题得到解决后, 也同时研究了水平极化横波 (SH 波)。普济廖夫等于 1985 年全面阐述了横波和三维三分量 (3D3C) 地震勘探, 推动多波地震技术走向成熟。

美国 (1966 年)、法国 (1969 年) 和西德 (1971 年) 都纷纷开展了对横波的研究, 作了许多试验, 取得了一定的成功。与此同时, 苏联研究的多分量垂直地震剖面 (VSP) 技术也促进了多波地震技术的发展。至此, 多波地震勘探开始进入了试验性生产阶段, 这一阶段的研究重点是针对岩性油气藏的勘探开发问题。尽管在利用岩性参数预测岩性、识别真假亮点等方面获得了成功, 但资料采集、处理、解释、经费等问题还是比较突出。这也是多波地震技术在工业化应用中发展缓慢的重要原因。

横波对各向异性比较敏感, 在横波勘探的过程中, 地层中的各向异性不能忽略。20 世纪 70 年代, Crampin 等证实, 岩石的层状结构、定向排列的垂直裂缝均将导致各向异性。裂缝体系在油气成藏的作用十分突出, 它是油气运移的通道和储集的空间。横波对各向异性的敏感特性成为了对油气勘探和油气田开发有重要价值和不可取代的新信息。因而进入 20 世纪 90 年代以来, 又一次掀起了多波多分量地震勘探技术研究的热潮。

尤其在多分量地震资料处理方面, Houston 等 (1989), Schafer (1991) 和 Cary (1995) 等完成了转换横波静校正方法研究, Slotboom (1990), Sena 等 (1993) 和 Zhang (1996) 对转换横波的动校正及偏移方法进行了研究, Lawton 等 (1994) 介绍了三维转换横波处理和解释实例, Wang (1996) 对转换横波叠前时间偏移进行了研究, 并提出了偏移速度分析方法, Peter W 于 1995 年提出了三维转换横波层剥离方法, Richards 于 1997 年介绍了美国风河盆地三维转换横波处理实例。在这些专家的共同努力下, 多波资料常规处理流程基本建立, 可以开展小规模试验性处理, 流程中基本包括转换横波静校正、抽道集、动校正、速度分析、倾角时差校正、叠加和叠后偏移, 转换横波处理技术对于复杂条件和各向异性还很不成熟。1997 年 James 指出了三维转换横波处理面临的主要挑战, 包括波场分离、水平检波器耦合、地表一致性横波静校正、CCP 分选、DMO 处理和横波分裂校正等。针对转换横波处理中存在的和各向异性的影响问题, Thomsen (1998), Bale 等 (1998), Grechka 等 (1999), Brzostowski 等 (1999) 等开展了大量的研究工作。特别值得一提的是 21 世纪初, 由李向阳教授领导的爱丁堡各向异性研究室 (EAP) 完成了转换横波各向异性叠前时间偏移流程及部分关键技术的研发, 包括共成像点道集生成、各向异性偏移速度分析、叠前时间偏移成像等处理。爱丁堡各向异性研究室在多波多分量地震资料方面作出了卓越贡献。

20 世纪 90 年代中期, 随着海底多分量电缆接收系统的出现, 1995~2000 年以发展海上多波勘探技术为主。研发的重点是多波勘探理论和方法, 要解决的地质问题是气态烃屏蔽问题。2000 年夏天, 由 SEG 和 EAGE (美国和欧洲两大勘探地球物理学会) 联

合举办的多波研讨专题会议具有阶段里程碑意义。这次会议对多波多分量地震勘探技术在油气勘探中的作用、存在的问题、应用情况和发展趋势作了阶段性的总结,在采集、处理和解释方面提出了进一步研究的方向,对利用井中地震、测井、岩心和其他地质及生产信息为多波多分量处理解释提供实质性帮助的重要性达成了共识。

21世纪以来,多波多分量地震技术(以3D3C地震勘探为主)在陆上的勘探逐渐兴起。2005年,SEG年会和当年夏天由EAGE和SEG联合召开的第二届多波研讨会是这个阶段的一个里程碑。针对多波多分量地震数据的采集,讨论了MEMS检波器的应用、矢量保真度和三维多分量采集等技术;针对多分量地震资料的处理,开展了转换横波叠前去噪、各向异性运动学特征和偏移成像等技术的交流;针对多波地震资料的解释与综合应用,重点讨论了介质的各向异性、裂缝检测、岩石物性参数反演、砂岩储层描述等问题。

## 2) 国内发展概况

我国多波地震技术起步较国外晚,“六五”期间才开始这方面的研究。1980年,四川石油管理局在遂宁地区试验性地实施了横波地震勘探,采集到了水平极化横波,并开展了相应的处理和纵横波地震资料联合解释。五年后,地球物理勘探局采用横波可控震源在河南、内蒙古等地区也开展了试验性的横波地震勘探。

“七五”期间,我国3D3C地震勘探技术的研究工作开始展开。中国地质大学、中国石油大学、成都理工大学、中国科学院等高校和科研机构,在正演模拟、岩石物理分析等方面开展了多波分量研究,针对采集、处理、解释等方法也开展了实践。“八五”、“九五”期间,中国科学院、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院、南京石油物探研究所及大庆、塔里木、辽河等油田相继实施了3D3C、2D3C地震勘探实践。

最近几年,国内多波勘探已取得了长足的进步。主要围绕多波多分量基础理论、岩石物理、三分量数字检波器设备、多分量资料采集技术、多分量资料处理技术、多波地震属性参数反演以及多波资料综合解释应用等方面进行研究,并取得了大量的研究成果,如转换横波采集观测系统设计、转换横波静校正的方法、转换横波波前扩散补偿、转换横波非均匀介质速度分析、转换横波速度分析与建模、转换横波叠前深度偏移、裂缝检测等。在此基础上,中国石油化工集团公司(简称中石化,SINOPEC)、中国石油天然气集团公司(简称中石油,CNPC)等各大油气田开始了规模不同的探索性工业化应用。2003年,中石油在长庆苏里格气田采集了3D3C资料。2004年,中石化分别在胜利和四川采集了3D3C地震资料。这几次采集都采用了先进的数字三分量采集系统和3D3C地震资料采集技术,资料品质有了显著提高,为3D3C地震资料处理、解释及综合应用夯实了基础。2008~2011年,中石化西南油气分公司先后在四川盆地合兴场-高庙子、孝泉、德阳南、丰谷等地区多次实施了3D3C地震勘探,有力地推动了多波多分量地震勘探技术向工业化应用快速发展。

## 2. 方法技术现状

多波多分量地震勘探技术主要利用地震波的运动学(走时、速度、结构、相似性等)和动力学(振幅、频率、相位、吸收、衰减、频散、方位各向异性等)等属性,以

及纵横波之间的时差比、振幅比、速度比、泊松比等参数,对储层空间展布、裂缝发育程度与走向、含气性及流体性质等进行描述。多波多分量地震勘探能够采集到比常规地震勘探更丰富的地震资料,为地震信息向地质信息转化奠定了坚实的基础,具备了高精度计算和实现途径多样化的有利条件。在多波多分量地震资料协作、互补的基础上,可以最大限度地消除地球物理预测的多解性,大幅度地提高对地质现象的认识精度,有力地拓宽对地质现象的认识范围。

尽管,多波多分量地震勘探技术在裂缝检测、含油气性识别等方面具有独特优势,受到国内外专家高度重视。但与常规地震勘探技术相比,多波多分量地震资料的采集、处理、解释更加复杂,关键技术的实现难度更大,资金成本更高。因此,自20世纪70年代以来,在超过30年的发展历程中,多波多分量地震勘探一直徘徊在小规模的试验阶段。

多波多分量地震勘探技术在油气藏勘探、矿产资源探测等方面具有广泛的应用前景。最早实现规模化生产应用的是海上三维四分量(3D4C)地震勘探技术。目前,陆上3D3C地震勘探技术发展势头强劲,在复杂隐蔽性、非均质性油气藏勘探方面展现出巨大的推广应用潜力和工业生产价值,已经成为地球物理领域的研究热点和油气勘探领域工业化生产的攻关重点。

近几年,多波多分量地震勘探技术的发展十分迅速。尤其是多波多分量地震资料的采集技术已经取得了突破性的进展。继挪威国家石油公司(Statoil)的Berg等于1994年开发了海底电缆多波接收系统从而大大地改善了多波数据质量之后,21世纪初,美国ION、法国CGG等地球物理服务公司研发了微电子机械系统(micro-electronic-mechanical-system, MEMS)数字式检波器,代替了传统的数模组合检波器,提高了陆上多波资料的信噪比和分辨率,也极大地降低了陆上多波勘探的成本,带动了陆上多波勘探技术的发展。

在多分量地震资料的处理方面,多分量旋转与检波器重定向、多分量矢量保真叠前去噪、转换横波静校正、转换横波各向同性和各向异性介质中共渐近转换点(ACP)/共转换点(CCP)道集的抽取、转换横波速度参数求取与建模、转换横波叠前时间偏移或深度偏移成像等进展显著。最具有代表性的是英国爱丁堡各向异性研究室在共渐进转换点道集生成、VTI介质转换横波速度分析与偏移速度分析、叠前时间偏移成像处理(Li, et al., 2001; Yuan and Li, 1998; Li and Yuan, 2003; Dai, 2003)等方面取得的一系列方法技术成果。然而,由于转换横波传播路径的特殊性,共转换点轨迹呈现向检波点方向的不对称分布,加之横波传播的速度较低、表层静校正问题更加突出等原因,多波多分量地震资料处理技术目前尚未完全成熟。仅3D3C地震资料的重定向和分量保真度处理、转换横波去噪、转换横波叠前时间偏移、转换横波各向同性和各向异性处理等方面部分技术接近了工业化应用水平。

多波地震资料解释的发展相对滞后。虽然多波井震标定、匹配、联合反演、全波属性提取等技术都取得了显著的进步,但纵波与转换横波高精度匹配的难度极大,纵横波联合反演的准确性受到制约,全波属性的应用受到影响。因而,多波地震资料解释技术在某个单一方面成功应用的实例比较常见,但效果显著且呈系统性综合应用的

实例并不多见,尤其是陆上多波勘探,效果显著的例子更少。现在业界公认的应用效果显著的例子有:Valhall 3D4C 用于气烟囱屏蔽(Barkved et al., 2004; Thomsen, 1999), Alba 3D4C 用于岩性屏蔽(MacLeod et al., 1999; Hanson et al., 2000)和 Emilio 3D4C (Vetri et al., 2003) 用于裂隙检测,这些实例均来自海上多波地震勘探的例子。

纵观多波多分量地震勘探技术的现状和产业链条,在理论、方法、技术方面取得了较大的进展,但对于多波多分量地震资料处理、解释,均面临同一个困境,那就是相关计算机软件资源的匮乏,严重影响了多波多分量成果数据的顺利获取和后期应用成果的转化。早在 2005 年, EAGE 和 SEG 就意识到了该问题的突出性,在当年夏天联合召开的第二届多波国际研讨会上,将多分量处理软件系统和多波解释软件系统的研发纳入了大会的研讨主题。

总之,近几年来,多波多分量地震勘探在理论、方法和技术等方面取得了长足的进步,尤其在海上 3D4C 地震勘探中取得了很好的效果。但是,将该技术从海上转移到陆上后,却遇到了很多的困难和问题,一直未形成成熟的陆上 3D3C 地震资料采集、处理、解释技术,更难以见到成功的综合应用案例。

### 3. 应用现状

近年来,随着人们认识水平的提高,勘探难度的增大,技术水平的进步及装备的发展,多波地震勘探越来越受到重视,并且其技术研究和油气勘探实践也取得了长足的进展。英国地质调查局(BGS)各向异性研究室在多波多分量理论和实际应用方面取得了丰硕的成果。国内外较大的石油天然气公司、地球物理服务公司也在陆上实施了许多的多波多分量地震勘探研究与实践(表 1-1)。具有代表性的公司包括国外的 ION、CGG-Veritas、WesternGeco 等服务公司,以及我国的 SINOPEC、CNPC、CNOOC 等油气公司。目前,通过研究与实践,国外在岩性判别、地质体成像、油藏监测、裂缝检测等方面取得了很大的进展。国内各大油田、研究所、高校等企业和科研机构也开展了大量的研究与试验,进展显著,如鄂尔多斯、大庆、四川等地区的试验和工业化应用。

表 1-1 全球 3D3C 地震勘探实施情况统计(据美国 ION 公司 2009.12.23)

| 公司名称           | 地点            | 面积/km <sup>2</sup> | 时间/年 |
|----------------|---------------|--------------------|------|
| SINOPEC        | 四川, 中国        | 526                | 2005 |
| BP             | Wyoming, USA  | 72                 | 2006 |
| Apache         | Canada        | 37                 | 2006 |
| Apache         | Texas, USA    | 199                | 2007 |
| East Resources | Colorado, USA | 80                 | 2008 |
| 大庆             | 大庆, 中国        | 200                | 2008 |
| Exxon          | Nigeria       | 800                | 2008 |
| SINOPEC        | 四川, 中国        | 566                | 2009 |
| PEMEX          | Mexico        | 40                 | 2009 |



续表

| 公司名称  | 地点         | 面积/km <sup>2</sup> | 时间/年 |
|-------|------------|--------------------|------|
| PEMEX | Mexico     | 297                | 2009 |
| PEMEX | Mexico     | 184                | 2009 |
| PEMEX | Mexico     | 461                | 2009 |
| CNPC  | 中国         | 119                | 2009 |
| BP    | Texas, USA | 20                 | 2009 |
| BP    | Texas, USA | 170                | 2009 |
| Devon | Texas, USA | 11                 | 2009 |

21 世纪初, 美国 ION、法国 CGG 等地球物理服务公司成功地研发出了微机电系统数字三分量检波器之后, 取代了传统的模拟检波器, 使陆上多波多分量地震资料的信号保真度、分量隔离度、分量一致性及信噪比和分辨率获得了大幅度地提高, 也极大地降低了陆上多波勘探的成本, 促进陆上多波勘探技术快速发展。在国内, 中国科学院刘光鼎院士、杨长春研究员主持了数字三分量采集系统研制工作, 并取得了重要的进展。

2003 年, 中石油在长庆苏里格气田利用美国 ION 公司的 System IV 仪器和 Vectorseis™ 数字三分量检波器采集了中国第一块 3D3C 地震资料。2004 年, 中石化西南油气分公司在 XC 利用 ION 公司的 System IV 仪器和 Vectorseis™ 数字三分量检波器实施了当时全球最大规模的 3D3C 地震勘探。2005 年, 中石化在胜利油田利用法国 CGG Sercel DSU3 在垦 71 地区进行了 3D3C 地震勘探。随后, 中石油西南油气田分公司、中石化西北分公司、中石油辽河油田, 中石化中原油田、中石化勘探南方公司、中石油大庆油田等先后开展了 3D3C 或 2D3C 地震勘探试验。2008~2011 年, 中石化西南油气分公司先后利用 ION 公司的 Scorpion VC 仪器和 Vectorseis™ 数字三分量检波器在四川盆地合兴场-高庙子、孝泉、德阳南、丰谷等地区多次实施了全球陆上规模最大的 3D3C 地震勘探, 资料面积超过了 2000km<sup>2</sup>, 促使多波多分量地震勘探技术的工业化应用日益成熟。

#### 4. 存在的问题

目前, 多波多分量地震勘探技术尚未完全成熟, 存在的问题还比较多。主要体现在以下几方面。

##### 1) 方位各向异性问题

在资料处理中如何考虑方位各向异性问题, 在资料解释中如何利用方位各向异性现象, 这是多波多分量地震勘探技术研究的重点。如果在处理中能够考虑方位各向异性问题, 就不仅能够有效地保护方位各向异性和横波分裂信息, 还可获得高质量的转换横波成像处理成果。这样, 在解释过程中进行裂缝预测和储层预测就相对容易, 并更加精确。在对多波地震资料进行各向异性分析的基础上, 能够利用多波频变各向异性特征反演裂缝尺度、利用频变特性探索流体性质。虽然, 英国 EAP 做了大量的基础研究工作, 但诸如流体性质判别等仍属尚未解决的世界性难题。

##### 2) 层剥离校正问题

在多波多分量地震勘探过程中, 当出现多个各向异性层时, 转换横波就会发生多次



分裂,在转换横波处理过程中就需要使用迭代层剥离法,先校正上覆地层各向异性层的影响,然后分析下伏地层的各向异性。结合横波与转换横波的传播特性,研究转换横波层剥离的机制是多波多分量地震勘探技术迫切需要解决的问题。

### 3) 多波处理、解释技术与人才问题

转换多次波衰减、速度估计及建模、矢量深度域成像、高精度纵横波自动匹配、纵横波叠前叠后联合反演、各向异性对转换横波资料处理的影响、处理质量监控等都是多分量处理面对的问题。

多波多分量地震数据解释仍处于理论分析、方法试验和小规模工业化生产阶段,缺乏系统、实用、全面的研究,缺少精通多波多分量地震勘探技术、岩石物理知识、地震地质综合解释技能的复合型人才团队,所以大规模投入生产应用困难不小。因此,无论国内、国外,提高多波地震资料的综合解释应用水平,推出更多的具有显著经济效益、标志性和权威性的陆上多波勘探实例,是下一阶段陆上多波多分量地震勘探技术发展和应用的重点。

### 4) 多波工业化软件系统问题

在多波软件发展方面,由于多分量地震勘探技术在国内外均属前沿技术领域,尚未形成达到工业化生产标准的多波多分量地震资料处理、解释软件系统。在国内,仅中石化、中石油和少数研究机构、高校中的少量人员作此方面软件研发。在实际应用中,具有多波特色的处理流程和解释性特殊处理,均需自主编程或借助某个软件系统的扩展软件包。现阶段,能提供部分多波多分量地震资料处理、解释的软件有 CGG5100 的多波处理软件包、VecterVista 多波解释系统、HRS 中 ProMc 纵横波联合反演模块、Transform 多波标定与匹配解释模块、CXTTOOLS 数据处理软件包等。这些软件包均来自国外的大型油服公司或科研机构。尤其值得一提的是,国内东方地球物理公司在 GeoEast V2.0 开发(2006.4~2008.8)中,增加了多波处理和解释方面的部分功能模块;中石化也组织了多分量处理、多波解释模块与软件系统研发,并取得了较大的进展。另外,2010年9月,CGGVeritas 公司发布了最新版 GEOVATION 处理系统,该处理系统是整合了 2D, 3D, 4D 多分量及宽方位于一体的全新处理系统,虽然该产品已经发布,但并未进入市场推广,目前处于内测和技术服务阶段。

纵观国内的多波多分量地震资料处理、解释软件系统,大部分属于初级的试验版本,而且每个软件侧重点都不尽相同,没有一套软件能独立地完全支撑多分量地震资料的处理工作。因此,建立多波多分量地震资料处理、解释软件系统,对于填补多波处理、解释软件空白,推动多波技术的工业化发展,具有十分深远的意义。

## 1.3 多波匹配技术研究现状及存在的问题

### 1. 方法技术现状

在 20 世纪 30 年代,苏联首次进行了横波勘探的理论研究和实践。但从 20 世纪 90 年代开始,多波勘探才得到广泛的应用和发展。多波分量解释技术也逐渐发展起来,其

在岩性解释、流体检测和裂缝描述中起到越来越重要的作用。然而,进行多波联合解释的前提是实现科学合理的多波层位对比与匹配分析。

随着勘探目标要求的提高,多波匹配技术的研究越来越受到人们的重视。该项技术一直是多分量地震勘探的难点之一,尤其是在地震资料品质较差和缺乏横波测井资料的情况下,对比就更加困难。随着多波多分量地震勘探技术的不断发展,纵、横波匹配技术已经成为地球物理学界研究的热点。Gaiser (1996) 认为,多波能否在精细刻画储层特征方面提供额外而非常有价值的信息,关键就在于能不能将 PP 波和 PS 波精确地匹配起来。

James 于 1996 年详细介绍了纵横波速度比 ( $\gamma_0$ ) 的求取方法,并用最大相关法求取  $\gamma_0$ 、平均  $\gamma_0$ 、层间  $\gamma_0$  等,使用 VSP 资料验证从 PP 波和 PS 波剖面中求取的  $\gamma_0$  可以用于短波长振幅反演。Chan 等于 1997 年利用常数  $\gamma_0$  值多次试算法,在时间对数域实现纵、横波匹配。由于浅层和深层的  $\gamma_0$  值不同,因此该匹配方法只能适用于特定的目的层。2001 年,Richards V D 和 James G 等利用最大相似性原理,扫描 PP 波和 PS 波的  $\gamma_0$  谱,拾取平均  $\gamma_0$  值,将二者在时间域进行匹配。Nahm 等于 2002 年通过对准主要探区断层瞬时相位时间切片,将 PS 数据匹配到 PP 上,并由此深入,找到了 5 块气田。Kendall 讨论了通过估算  $V_p/V_s$  比率来匹配 PP 波和 PS 波,但并不能完全准确匹配;其后,利用声波测井资料和 VSP 信息,且在部分地区通过人工干预和反复迭代,来实现 PP 波和 PS 波的精确匹配。Garotta 等 (2002) 通过相关求取纵横波速度比,在时间域初步匹配 PP 波和 PS 波,联合二者 AVO 属性进行弹性反演。2003 年,Sergey F 等研究了一套自动纵横波匹配算法,认为 PP 剖面到 PS 剖面的时间映射弯曲函数  $w(t)$  可以通过 PP 波时间函数除去振幅增益补偿函数  $a(t)$  来得到,利用最小二乘法优化全局最优解,并估算逐点的互相关函数、推导纵横波速度比,进而实现自动匹配;在墨西哥湾的应用中,发现了其他方法不能找到的沉积构造的气云伴影。Van Dok 和 Kristiansen 采用人工手动拾取强同相轴和其他明显的地质特征,实现了 PP 波和 PS 波在时间域的粗略匹配。Michael V D 等从 PP 波和 PS 波中求得纵横波速度比和泊松比,基于建立的横波模型,在深度域实现纵横波匹配,并应用于墨西哥湾,描述浅海沉积特征,在识别有效储层、指导天然气工业开发方面发挥了重大作用。Fomel 和 Backus (2003)、Nickel 和 Sonneland (2004) 建议采用最小二乘法进行 PP 波和 PS 波时间匹配,其目的是经过多次快速迭代来实现自动同相轴匹配,尽量减少人工干预。Michale N 于 2004 年开发了一套匹配算法,通过多次迭代计算 PP 波和 PS 波属性,然后进行低通滤波,估算二者时差,将结果作为二次迭代输入,反复迭代,求得高精度的纵横波速度比,进而在时间域精确匹配 PP 波和 PS 波。Liner 和 Clapp 提出地震道对偶校准法。2005 年,Xu 和 Robert R S 在罗斯湖油田使用多分量解释软件包 ProMC,利用最大相关理论,在大套地层对准的原则上实现 PP 波和 PS 波的时间匹配。Sergey F 等提出多步法实现二者匹配,首先利用最小二乘进行初始时间匹配,其次是振幅和频率平衡匹配,再次进行剩余  $\gamma_0$  扫描,最后进行时间匹配的微调。将该技术应用于 Texas 西部识别碳酸盐储层。Yuan 等 (2008) 采用模拟退火算法求得 PP 波和 PS 波反射波最大相似性实现时间匹配,而 PP 波和 PS 波波频带的差异则通过时间变化的谱白化实现匹配,并且对相位也