



中国海上气田 时移地震实践

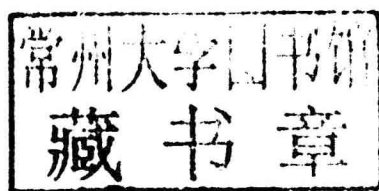
谢玉洪 陈志宏 周家雄 编著



石油工业出版社

中国海上气田时移地震实践

谢玉洪 陈志宏 周家雄 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了时移地震技术的野外数据采集、地震数据处理、地震资料解释三方面内容，并针对海上气田时移地震实践，总结了一套时移地震的实施方案。

本书可供油气开发地震技术研究的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国海上气田时移地震实践 / 谢玉洪, 陈志宏, 周家雄编著.

北京: 石油工业出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-5021-8387-5

I . 中…

II . ①谢… ②陈… ③周…

III . 海上油气田 - 油气勘探: 地震勘探 - 研究 - 中国

IV . P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 066913 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

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.5 插页: 2

字数: 300 千字

定价: 58.00 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

时移地震（Time Lapse Seismic）是近年来迅速发展起来的一项现代油气藏管理技术，已在全球不同地区的许多油气田得到了成功应用。它既为油藏工程师提供了更丰富的油藏空间信息，也为地震勘探技术开辟了新的应用领域。

时移地震技术是利用油气田在不同开发阶段采集的地震资料属性之间的差异来研究由于油气田开发导致的流体场、压力场等的变化，实施油气田动态监测的地震技术。该技术主要用于完成油气田评估和完善油气藏的开发方案。时移地震研究的目标不再仅仅限于储层，它是在识别有效储层的基础上，通过研究由于注采等油气开发活动引起的油气藏储、盖层的岩石运动学和动力学特性的变化来推断储层流体场和压力场的变化，如油气水界面、注水波及面、有效孔隙压力、孔隙体积、储量动用范围等变化，并根据这些变化来完善油气田的开采方案，优化油藏管理策略，达到提高油气开采速度和最终采收率的目的。

时移地震技术的理论基础是岩石物理学和地震波动力学，关键问题是如何解决好从地震资料的属性信息到岩石物性和地质属性之间的有效转换。引起油气储层的岩石动力学特性变化的因素十分复杂，并不仅仅局限于油气开发活动，这种变化可以分为与油藏变化相关和与油藏变化无关两大类。因此，在时移地震技术的应用中需要明确岩石物性变化的起因，不但要识别出与油藏变化无关（如地震数据采集差异等）因素的影响，还要考虑储盖层的压实、流动屏障、流体通道和流体本身等多方面的影响。

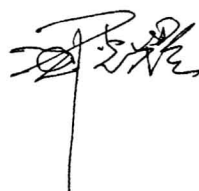
作为对油气藏进行管理的一套极有潜在价值的工具，时移地震技术正在逐步走向成熟，但它在实际运用中还需要克服多方面条件的限制。

时移地震技术要解决的首要问题是降低重复地震数据采集过程中造成的差异，如震源激发类型和沉放深度、偏移距大小、接收装置类型和空间位置、记录仪器类型和记录档位因素等采集参数，以及环境因素（潮汐、潮流、环境噪声、海水温度等）的一致性等问题。

其次,时移地震资料处理也存在许多需要完善的地方,主要表现在:(1)重复地震数据采集获得的岩石地球物理信息差异量级难以满足时移地震所需的要求。这是因为开采和流体驱替引起的岩石地球物理特性变化比较微弱,低于岩石物理实验的背景噪声,造成时移信号识别困难。(2)注入或采出的流体由于储层非均质的影响,冲刷效果不够理想,引起的孔隙压力增加或减少没能在冲刷带引起足够的岩石地球物理特性变化。

本书主要内容为时移地震理论基础,时移地震的数据采集、数据处理和数据解释,以及时移地震实践等。该书从实际应用出发,通过大量的实例分析,论述了适用于气田开发早期储层仅压力场变化而流体场不变、开发中后期储层压力场和流体场均发生变化不同阶段的主要技术问题和解决方案。同时,该书还从气田的生产动态分析角度研究了时移地震的影响因素,这对时移地震技术本身也是一个很好的补充。

本书适用于从事石油天然气开发地震技术研究和工程应用的技术人员阅读,其中对从事海上油气开发地震的技术人员尤其适用,也可作为石油院校相关专业的教学和科研,或行业培训的参考用书。



2011 年 12 月

前言

时移地震是利用不同时间采集的地震资料之间的差异来检测由于油气田开发而导致的地下流体场、压力场和储层物性的变化；并利用这种变化来指导油气田的管理和开发调整，以达到提高油气田采收率和开发效益的一项技术。它可以为油藏工程师提供更多的空间信息，目前已经成为油藏管理的有效工具，同时也为地球物理学开辟了新的应用领域。

时移地震是目前油气田开发中应用效果较好的一种地震方法。壳牌 (Shell) 和英国石油公司 (BP) 的专家们认为时移地震技术的应用有可能会使得油气田的采收率提高 15% 左右，油气田技术服务公司和石油公司在此方面投入了相当大的力量，因而近年来得到了迅速发展。由于时移地震技术是在已开发的油藏中应用，所以相对其他地球物理技术而言，在石油公司和油田技术服务公司之间呈现更为开放和合作的状态。自 20 世纪 80 年代初期提出以来，时移地震技术的发展起伏跌宕。80 年代初期的时移地震技术比较强调检波器几何位置的绝对重复，造成地震采集成本大幅增加，从而在地球物理界对这种技术的接受提出了严重的挑战，使得此技术在相当长时间内处于停滞不前的状态。进入 20 世纪 90 年代，三维地震技术得到广泛应用，而且在相当多的地区，重复采集了不同时间的三维地震资料。进入 21 世纪后，工业界提出了 E-Field 的概念，即在开发初期，就在油气藏相应的地表和井中安置检波器，随着油气藏的开发，根据需要在油气藏对应的位置进行地震数据采集，这样就获得真正的四维地震数据。如果对油气藏进行全开发过程的监测，从成本和效益的角度而言，这种做法是最佳的。时移地震技术的关键首先是数据的一致性，即获得油气藏变化的响应，同时使得非油气藏因素的地震信号一致，其中包括采集一致性技术、处理一致性技术和互均衡技术；其次是获得可靠的差异，利用岩石地球物理和油气藏生产动态资料来解释这些差异，获得油藏开发过程中储层特性、流体性质变化的信息。

海上气田具有独特的地质地理环境与地球物理特点，因此海上时移地震技术的应

用研究是一个具有挑战性的课题。笔者以东方 1-1 气田为主要研究目标，开展了长达 4 年的海上气田的时移地震技术应用研究。

本书以东方 1-1 气田时移地震技术应用为主，详细介绍分析了时移地震技术的理论基础、数据采集的方案设计及实施、数据处理和基于生产动态分析的时移地震研究等关键技术。

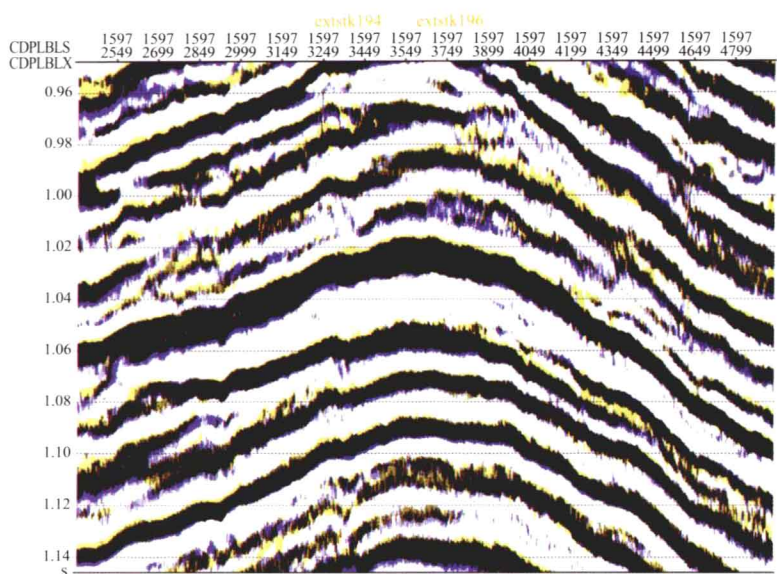


图 7.18 时移测线 1597 相位差异分析图

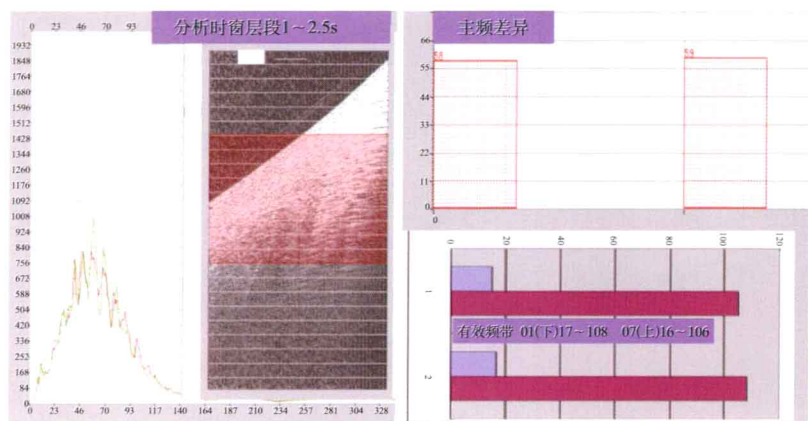


图 7.22 时移测线 1597 分辨率差异分析

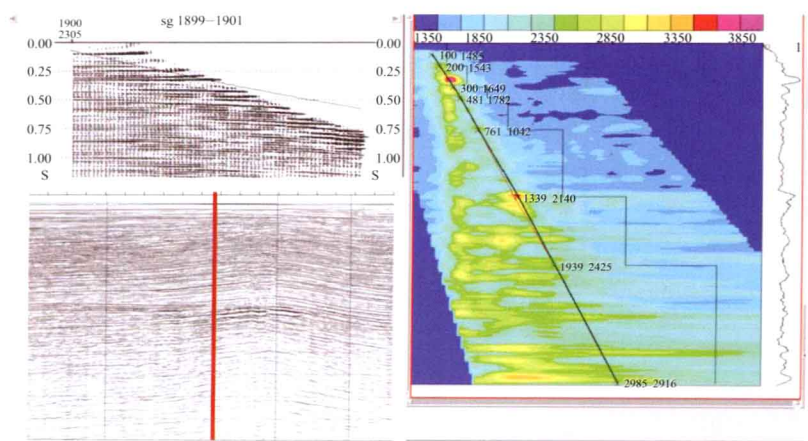


图 7.24 时移地震 3752 测线资料速度差异分析

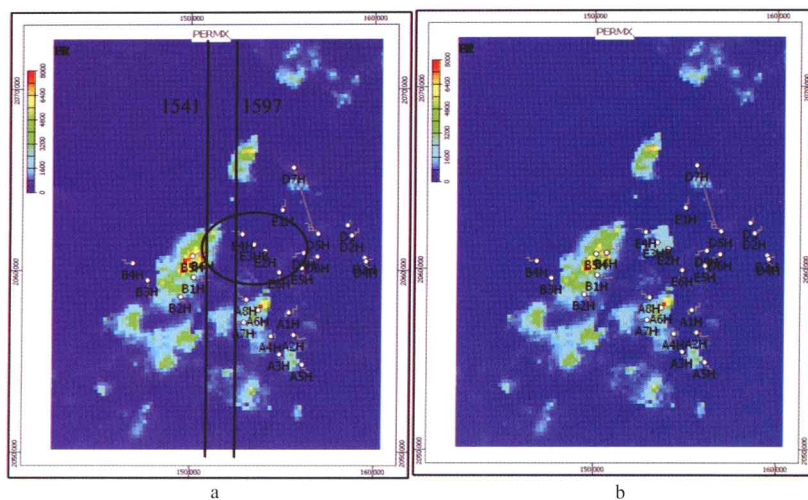


图 7.56 模型修改前后渗透率平面对比图

a—模型修改前 74 个小层渗透率叠加分布图；b—模型修改后 74 个小层渗透率叠加分布图

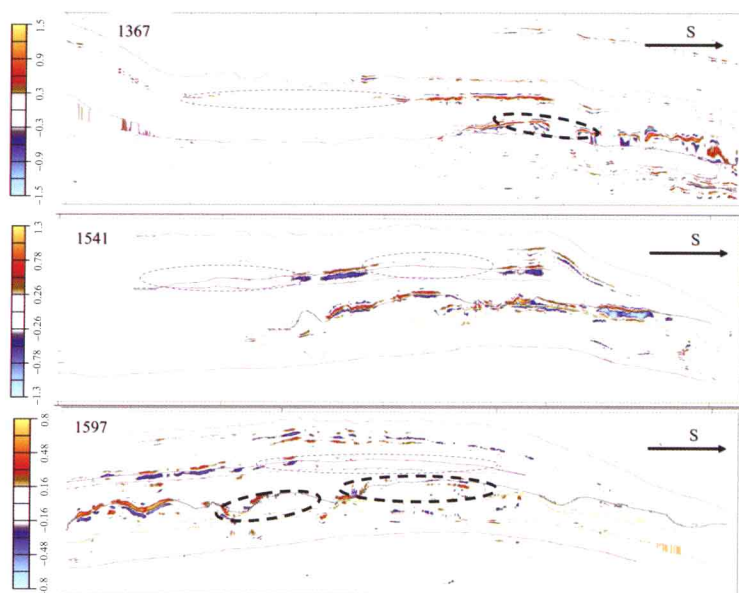


图 7.63 时移地震 1367、1541、1597 测线地震振幅差异剖面

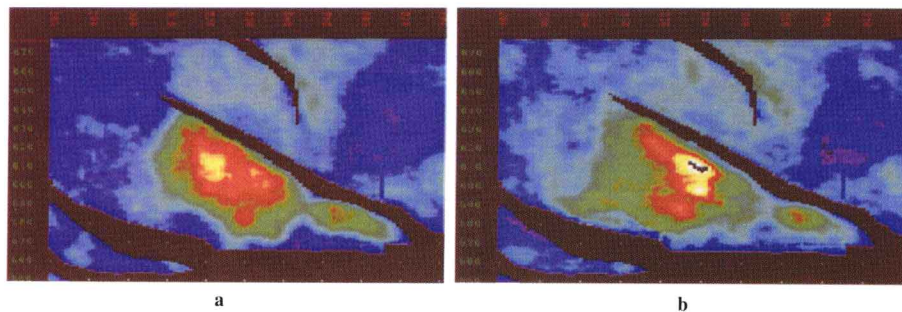


图 7.66 E 气田开发前 (a) 后 (b) 气层顶面振幅对比图

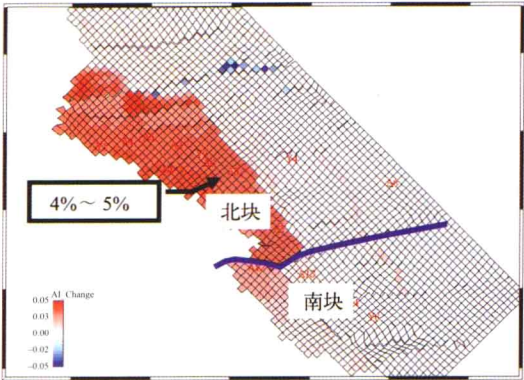


图 7.69 模拟气层波阻抗的变化趋势图

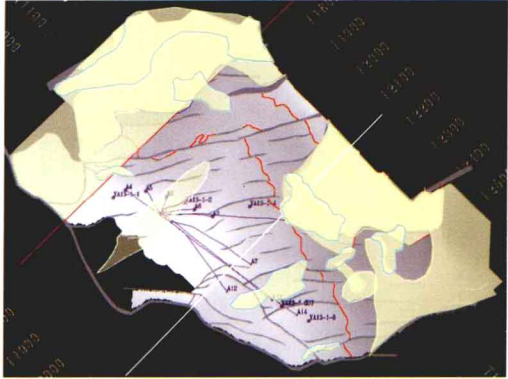


图 7.70 四维地震重复性差的区块分布图 (黄色)

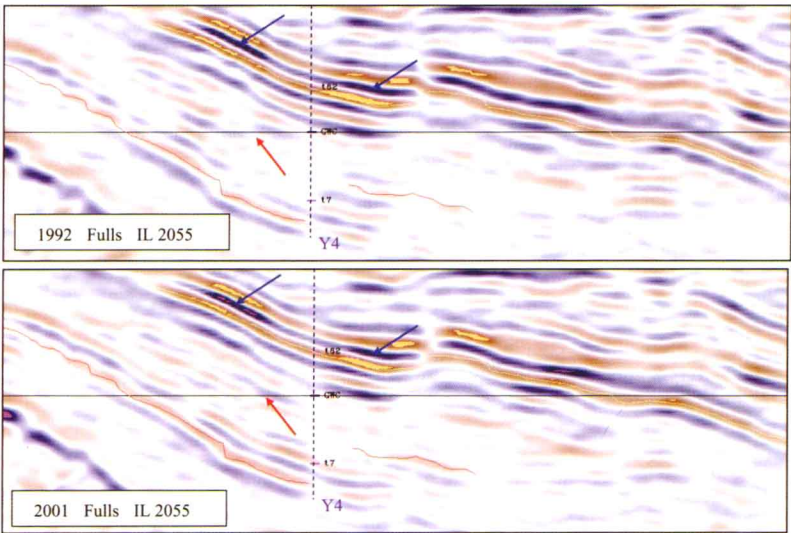


图 7.71 崖城 13-1 气田四维地震剖面对比图

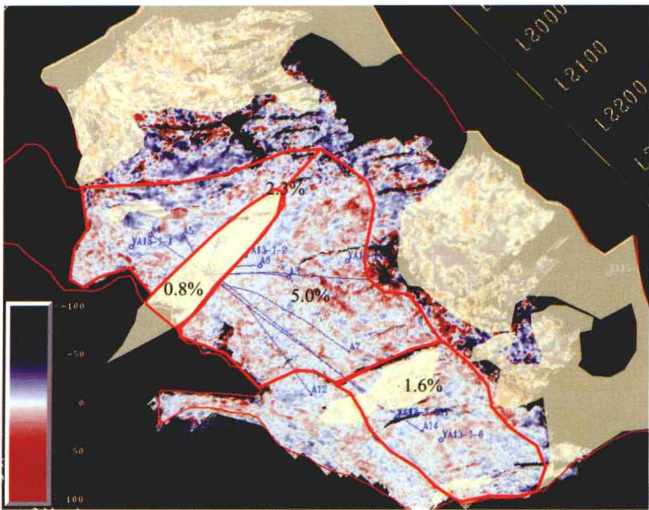


图 7.72 崖城 13-1 气田四维地震振幅差异图

目 录

1	时移地震技术概述	001
1.1	时移地震的基本概念	001
1.2	时移地震技术的应用现状	001
1.3	海上气田时移地震技术的基本方法	002
2	岩石物理基础	004
2.1	多相介质模型及描述	004
2.2	地震波传播及属性参数	007
2.3	岩石物理测试研究	022
2.4	岩石物理模型	026
3	时移地震正演模拟研究	033
3.1	孔隙介质地震波的波动方程	033
3.2	注水模型地震响应模拟与分析	035
3.3	典型时移地震正演模拟分析	039
4	海上时移地震数据采集技术	047
4.1	时移地震采集时机分析	047
4.2	海上时移地震采集影响因素分析	047
4.3	海上时移地震数据采集技术要求	049
4.4	海上时移地震采集设计原理	052
4.5	海上时移地震数据采集质量监控	056
5	海上时移地震数据处理技术	059
5.1	时移地震资料品质评估	059
5.2	时移地震数据的预处理	064
5.3	噪声和多次波压制处理	066

5.4	子波处理与反褶积.....	072
5.5	速度分析与成像处理.....	076
5.6	时移地震数据归一化处理.....	077
5.7	时移地震数据互均衡技术.....	082
5.8	时移地震数据求差处理及分析.....	088
5.9	特殊处理技术.....	090
5.10	时移地震数据处理新方法简介	092
6	时移地震资料解释.....	097
6.1	时移地震资料的响应特征.....	097
6.2	差异地震属性与分析原则.....	097
6.3	开发生产动态资料与时移地震的适配性	099
6.4	时移地震资料解释方法.....	100
7	海上气田时移地震实践.....	103
7.1	东方 1-1 气田概况	103
7.2	东方 1-1 气田开发生产动态分析	107
7.3	东方 1-1 气田时移地震可行性分析	108
7.4	东方 1-1 气田时移地震数据采集	112
7.5	东方 1-1 气田时移地震处理	116
7.6	东方 1-1 气田时移地震解释	135
7.7	东方 1-1 气田时移地震在开发中的应用	161
7.8	东方 1-1 气田时移地震的技术特点	162
7.9	崖城 13-1 气田时移地震实践	163
8	时移地震技术的发展方向及应用前景.....	168
	参考文献	169

1 时移地震技术概述

1.1 时移地震的基本概念

时移地震是近年来发展起来的前沿性地球物理探测技术，它是指在同一地区不同时间段内根据需求进行的重复地震探测工作，以期能够监测出地下油气藏由于开发而引起的油气水饱和度变化的地震响应，从而准确确定剩余油的分布和变化，为及时调整注采方案，优化油田开发方案提供科学依据，最大限度地降低采油成本和提高采收率。在时移地震勘探中，油田投产前所采集的地震资料称为基础数据，开采后重复采集的地震数据称为监测数据。解释人员通过解释对比两次地震在相位、反射振幅、地震速度和属性上的差异并结合油田生产开发动态资料，判断油藏开采过程中的流体动态特征，进而预测剩余油的分布范围，指导油田开发方案调整。

时移地震按观测方式可分为以下四类：

(1) 时移三维地震，常称四维地震。这是目前较常应用的时移地震技术，它的成本最高，效果也最好。

(2) 时移二维地震。其特点是成本低，易实现，效果也较好。

(3) 时移 VSP。研究井史及井旁油藏特征变化规律的好方法。目前已有三分量及九分量时移 VSP。

(4) 井间时移地震。利用井间重复地震的方法来实现油藏动态管理。

1.2 时移地震技术的应用现状

从国内外的应用情况来看，时移地震在海上油气田中应用较多，而且主要集中在北海和墨西哥湾，陆上应用较少。这主要是由于海上地震资料的信噪比高、数据采集可重复性较高、易实现。国内于 20 世纪 80 年代开始开展有关时移地震的方法技术及应用研究。1988 年胜利油田首次在国内开展了时移地震试验，在单家寺地区进行蒸汽吞吐与蒸汽驱稠油热采地震监测；1993 年至 1995 年，新疆石油管理局开展了时移地震监测稠油开采的先导性试验，根据监测地震资料改变了注采方式，收到了较明显的效果；辽河油田对 Q12 块 Q64-54 井区进行了蒸汽驱稠油热采的时移地震监测，由于分辨率不满足成像要求，两次采集差异无法反映储层信息的变化而没有取得预期效果。中国石油勘探开发研究院从 1999 年开始一直从事时移地震研究，他们以渤海湾高孔、中高渗油藏的岩石物理数据为基础，结合冀东时移地震采集资料，从可行性论证、地震资料叠前和叠后互均化处理，以及动态油藏描述等方面对水

驱时移地震技术进行了系统的研究,取得了许多重要成果,初步形成了配套技术,并在高 29 断块、高 104-5 和柳 102 油藏进行了试验应用,初步达到了工业生产的能力。

与此同时,许多专家学者对时移地震的理论方法进行了不同程度的研究,在众多油田进行了先导试验。中国石油大学(北京)在时移地震可行性方面进行了深入探讨,与大庆物探研究所合作,开展了薄互层注水开采条件下时移地震应用可行性研究,针对大庆油田薄互层油气藏注水开发的具体地质条件,从理论上对注水开发时移地震监测的可行性做了深入的研究,并对历史的地震资料进行了处理分析;中国地质大学(北京)在时移地震处理和解释方面进行了重点研究。“八五”期间,国家自然科学基金重大研究项目“陆相薄互层油储地球物理理论与方法”设置了“储层条件下油储岩石物性测量和规律”课题,对岩心物性进行了地层条件下的实验测量和规律分析,用于时移地震先导性试验,取得了一定的应用成果。

我国海上油田的时移地震技术的应用研究则始于本世纪初。2005 年开展了国家高技术研究发展计划(863 计划)项目——“海上时移地震油藏监测技术”研究,在渤海湾开展了水驱稠油油藏的时移地震监测试验,通过地震岩石物理学实验研究表明,因油藏开采造成的原油脱气(即储层内出现游离气)引起的地震波速度变化和地震异常,要比单纯流体替换引起的速度变化和地震异常大很多。

中国海洋石油总公司湛江分公司针对海上气田的开发与气藏监测开展了长期的时移地震技术攻关研究,其中,比较有代表性的工作是承担了“东方 1-1 气田时移地震技术研究及应用”生产性科研综合项目,从岩石物理、可重复性地震数据采集、地震均衡处理技术,以及特殊解释技术,等方面开展了系统研究,取得了良好的地质效果和宝贵的经验。

1.3 海上气田时移地震技术的基本方法

时移地震技术用于油气藏生产过程监测,可以有效地对地下油气资源进行管理,并最大限度地提高采收率和盈利水平。生产过程中油气藏含油饱和度、地层孔隙压力和流体温度的变化将导致油气藏岩石动力学性质发生改变,从而使得地震波场响应发生变化。因此,利用时移地震数据就可以对油气藏进行监测,并预测油气藏中流体的运移方式,确定剩余油气的分布位置,调整相关生产井的产出量,避免过早生产见水或出现水淹;此外,优化加密井定位,可实现油气资源最优化开采的目的。

时移地震技术对生产中的油气田监测的关键就是多次观测数据之间的差异。一个油气藏的静态图像可能不会显示出任何明显与生产相关的响应,但是不同生产阶段采集数据间的差异就有可能演绎出油气藏性质的变化,甚至是很细微的变化。油气田开发初期采集的地震资料是建立油气藏数据库的基础,表现为静态图像,而在油气田生产各个阶段的监测数据是动态资料,描述的是动态图像。静态图像与各个动态图像的差异,就演绎出油气田生产的历史。这些动静态数据或图像的差异构成了时移地震数据差异体,它与油气藏生产动态和油藏数值模拟相结合,就可以准确地追踪生产井之间或油田内流体性质的动态特征。

时移地震技术用于油藏监测并非简单地使用两次观测的原始地震资料,必须经过一系列特定的数据处理之后才能反映油藏的变化。油气藏的监测是一个多学科综合应用的系统工程,时移地震是该项工程中的一个关键技术环节,这个环节能否成功地达到预期的效果,实现油藏监测目标,需要完成一系列研究工作。

海上（气田）时移地震研究的内容主要包括：岩石地球物理实验、地震探测精度可行性研究、地震可重复性采集及评价、时移地震资料处理与解释方法研究、时移地震剩余油气分布预测研究，以及时移地震经济可行性评价等内容。

可行性研究包括技术可行性与经济可行性。技术可行性研究是指油气开采过程中油气藏变化引起的地震响应变化的可观测性，它包括岩石地球物理实验、地震资料的精度、采集环境因素等，也就是回答什么样的油气藏可以利用时移地震进行监测。岩石地球物理实验重点研究在生产（开采）过程中油气藏储盖层在地震资料上的响应。这种响应主要来源于油气藏岩石骨架弹性特征、孔隙流体压缩系数差异、采油方式和油藏参数四个方面。地震资料的精度主要包括地震资料主频、频带宽度、信噪比、成像质量、可重复性、流体界面可视性等，对于海上时移地震技术而言，由于移动定位、拖缆羽角等采集因素的弱可控制性，地震数据的可重复性采集评估与计算更为苛刻，通过对以上各个因素进行定量评分给出油气藏时移地震技术综合风险评价表。

经济可行性的目的是要回答什么样的油气藏值得使用时移地震。一般而言，时移地震投资收益率要达到油公司内部收益的预期。

时移地震资料处理首先是克服地震采集所造成的“脚印”问题，同时尽可能使与有关油气藏动态变化所造成的地震响应进行最佳成像，强调互均化处理。

时移地震资料解释是突出有关油气藏动态变化所造成的地震相关特性变化，强调真实性与可视化，与油气藏数值模拟以及动态生产资料的结合效果更佳。时移地震研究内容主要有地震多属性分析与模式判别、地震反演、AVO 分析等。

2 岩石物理基础

油气藏的岩石物理模型和物理性质的研究是时移地震技术应用的基础，因为时移地震的差异实质上来源于岩石物理性质的变化。为此，我们对东方 1-1 气田的主要目标区岩石物理进行了较为系统的研究，包括储层条件下岩心样品的原位岩石物理参数测量、储层条件下流体性质评估、地层压力变化对地层波速、密度和孔隙度影响效应的实验研究、流体替换实验研究和地震正演模拟研究等。这些研究结果为最终的时移监测数据的综合分析和应用提供了理论基础。

2.1 多相介质模型及描述

2.1.1 多相介质

根据 Biot 理论，若多孔介质的孔隙单元相互连通，则地震波在含流体的多孔介质中传播时，由于流体和固体的振动相互作用与相互耦合，会使孔隙中的流体在孔隙空间流动（比如从一个孔隙向周围较大的孔隙空间流动），从而引起流体和固体颗粒的相对运动，导致波的振幅衰减。其振幅衰减项 $\tilde{A}$ 可表示成如下公式，即

$$\tilde{A} = \frac{\eta \phi^2}{K} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (2.1)$$

式中， ϕ 为介质孔隙度； K 为介质渗透率； η 为流体黏滞系数； u 为介质固体位移； U 为介质液体位移。

从 (2.1) 式可以看出：(1) 在多相介质中，地震波振幅衰减与介质的衰减系数 $\frac{\eta \phi^2}{K}$ 及流体与固体的相对运动速度 $\left(\frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right)$ 成正比；(2) 流体和固体颗粒相对运动速度很小时，也就是流体被骨架“锁住”，地震波衰减最小而振幅最大，这种现象就是所谓的“共振”，它只存在地震波的某一低频率上；(3) 流体和固体的相对运动随着频率增加，由于惯性作用，流体和固体之间的相对运动速度增大，在某一频率处，地震波衰减最大，而振幅最小，这种现象就是所谓高频衰减；(4) 在有限带宽内，从低频向高频方向移动时，存在低频衰减最小值和高频衰减最大值，这是双相介质和单相介质的最大区别；(5) 由于石油和天然气黏滞系数