

易维启 李明 编著
云美厚 陈小宏

时移地震方法概论



时移地震方法概论

易维启 李 明 编著
云美厚 陈小宏

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对时移地震 (Time-lapse seismic) 基本理论与方法进行了研究, 对注水时移地震监测的可行性进行了模型模拟, 研究了时移地震资料处理方法和解释方法。书中大部分内容都是作者近几年研究的最新成果, 有的成果是首次公开。

本书的内容是作者多年来的研究成果, 既是一本专著, 又是一本可以面向普通读者的科普读物, 适合勘探、开发的广大科技工作者和大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

时移地震方法概论/易维启等编著.

北京: 石油工业出版社, 2002.1

ISBN 7-5021-3620-7

I. 时…

II. 易…

III. 地震勘探-研究

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 087322 号

石油工业出版社出版发行

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 194 千字 印 1—2000

2002 年 1 月北京第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3620-7/TE·2666

定价: 20.00 元

序

自从 20 世纪 30 年代反射地震法用于矿产资源勘查以来,地震勘探工作在人类物质文明发展中特别是在石油工业的发展中做出了具有重大历史性的贡献,发挥了其它探测手段不可替代的作用。它的伟大功绩将在人类文明史中占有一席之地。这是几代勘探地震学家和广大的物探工作者对人类做出的贡献,应当给予正确而应有的历史评价。

地震勘探的发展与成功离不开石油工业,而石油至今仍然是人类社会不可或缺的现时能源之一。从长远角度来看,现在人类面临的石油能源问题确实是相当严峻的。各种各样的预言家认为,本世纪中叶将是石油和天然气枯竭之时。这种预言和推测深深地影响着人类的命运。因为到时如无新的可替代石油的能源,人类社会的高度文明也就无从谈起。当然我们相信,人类社会高科技的飞速发展到未来可以取得廉价的核聚变能、太阳能或者通过合成技术从海水取得各种人工合成烃类以替代石油能源。但是我们禁不住要问,石油在本世纪中叶枯竭的立论根据是什么?我认为,它是根据当前的科学技术和已探明的油气田来论证的,并没有考虑科技进步的因素,也没有考虑海洋中尚待开发的油气资源,特别是天然气水合物的能源,它远远超出已知油气能源的 2 倍以上的这个因素。因此,我们有充分的理由认为地球上的油气资源还远没有研究清楚,石油勘探和开发还要发展适当的高新技术,特别是地震勘探方法和技术。

地震勘探从野外观测技术的发展来说,先后有过光点记录、模拟磁记录和数字记录。从处理和解释方法的发展来说,先后有人工计算、绘图与解释年代,计算机数据处理与人工解释年代和计算机处理和人机交互解释年代。当前正在走向计算机处理和解释一体化年代。从研究油气储层圈闭的地质条件来说,地震勘探已从最初的地质构造为主的研究和后来从事地质构造与岩性圈闭的研究,发展到今天地震勘探正在进行多种储层类型的油气藏描述和油气藏开采过程的油气圈闭变化的动态研究。本书针对油气藏在开发过程中的动态变化和在反射地震记录上的反映特征及其规律性等问题进行了分析与探讨。在这个研究方向上的地球物理学家称之为时移地震方法,简称时移地震。

据我所知,时移地震方法在正式介绍出来之前已经酝酿了很久。20 世纪 50~60 年代就有人对两次地震反射记录振幅的变化进行过研究。到 70 年代,国外石油公司的研究部门已经开始进行过两次和两次以上地震观测数据的对比研究。正式以学术论文发表是在 20 世纪 80 年代初期。目前,用时移地震方法对油气藏进行动态监测的工作已初步形成了石油工业的一项技术措施。从发表的统计数据来看,1997 年世界上用于时移地震的费用达到了 5 亿美元,占当年地震勘探工程费用的七分之一。预计到 2005 年,全球用于时移地震的经费将达到 35 亿美元。因此时移地震方法是一个重要的地震技术,已成为油藏动态描述的一项基本内容。

但是,我国的许多石油科技人员对时移地震方法还不太熟悉。由于我国油田的地质条件的复杂性,开发适用于中国特点的时移地震方法是很迫切的。在这种情况下很需要一本介绍时移地震方法的科技参考书。易维启博士等人编写的这本《时移地震方法概论》是非常及时的,也是广大石油科技人员及相关专业师生所企盼读到的一本书。在这本书中,作者比较系

统地对时移地震所涉及的方法技术和实际应用的问题进行了探讨，并且以自己的实践为基础给出了一些实例。这本书是作者对国内外时移地震的方法原理和实际经验进行系统研究总结之后编写的。其中也有自己的经验和体会。当然，由于时移地震的理论、方法和应用在整体上还不够完善，因此本书不可能是全面而完备的。但是，它确是一本有关时移地震方法的入门书。我想它会起到应有的历史作用的。我希望这本书能够引起我国石油公司和地球物理公司的注意，为将时移地震技术应用到我国的油气田开发作出贡献。另外，必须说明的是，这项技术还不是一项成熟的技术，特别是对我国的陆相油气田而言。开展和应用这项技术不可能是那么顺利的，需要有自己的、发展的、独特的技术才能成功。希望这项技术能够在我国取得良好的效果，为我国的石油工业发展做出贡献。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '吴家荣' (Wu Jiarong).

2001 年 11 月 15 日

作者的话

时移地震技术在 20 世纪产生后，很快就传入我国，国内较早比较系统介绍这一高新技术的有我国著名地球物理学家欧庆贤教授。记得 20 世纪 90 年代初在河北涿洲地球物理勘探局召开的一次东部石油地球物理勘探交流会上，欧教授专门作了四维地震勘探技术的发展现状与方向的报告，但当时并没有引起与会者的高度重视。

1997 年美国勘探地球物理学家学会 (SEG) 年会上宣读的有关时移地震的论文就有 18 篇，但没有一篇与中国有关。在 1998 年北京召开的 CPS/SEG/EAGE 国际地球物理研讨会上，有关该技术的论文增至 25 篇，与我国有关的也只有 4 篇，这与中国从事地球物理研究的人员比例相比很不相称。造成这种现象的原因是多方面的，其中一种不可忽视的原因是有关中国时移地震的参考文献太少，实例更少，系统介绍该技术的专著更是空白。作者在近几年有关该领域的研究期间，经常苦于找不到陆相盆地时移地震的文章和实例而影响研究工作。作为一名中国地球物理学者，一种沉重的责任感始终提醒我们：中国需要一部系统介绍时移地震基本理论与方法的专著！

近几年来，作者在该领域做了一些基础研究工作，取得了一些初步认识。我们在研究工作中深深感到，每一个科技工作者都有义务将自己的研究成果贡献给人类，无论这种成果是成功还是失败，这样才能使后来者不走弯路。从这种思想出发，我们才有勇气将近年来取得的肤浅认识提供给广大的同行参考。希望通过本书的出版起到抛砖引玉的作用，使更多的有志之士参与时移地震技术的研究，提高我国的油田管理水平。

本书的内容是作者多年来的研究成果，既是一本专著，又是一本可以面向普通读者的科普读物，适合大专院校学生、研究生和广大科技工作者参考。由于作者的水平有限，书中不妥之处在所难免，真诚希望广大读者提出宝贵意见。

本书的研究成果部分得到了国家自然科学基金委员会（项目批准号：49974030）的资助。

在本书的研究和编写过程中，刘光鼎院士、马在田院士、王家林教授和巢华庆教授给予了精心指导，在此表示衷心的感谢！

作者 2001 年冬于北京

前 言

石油勘探发展到今天,大规模的油气田已基本发现。因此,在提高老油田采收率和发现新油田两者之间,前者已显得越来越重要。改进现有油、气藏采收率的有效途径是进一步解释此类岩石内部结构的非均质性、以及石油是如何在岩石内部流动的。时间推移地震(Time-lapse seismic)简称时移地震,它利用重复多次地震测量来监测井间油、气藏随时间的动态变化。该技术不仅能监测油气边界的变化和注入流体(如水、蒸汽、 CO_2 和气等)的移动,而且可以探测和发现死油区,进而指导油田开发井位的合理布置,提高最终采收率。时移地震使地震勘探从静态的构造和储集层描述发展到油、气藏动态监测,把时空概念引入油田开发,给油田生产方式带来了基本观念的转变。它已经对合理规划和管理油气藏产生了积极的影响。

时移地震作为一门技术产生于20世纪80年代初期,为了监测注气开采的效果,ARCO公司于1983年首次实施了时移地震勘探项目(Greaves, Falp 及 Heed 1983, 1987); Pulin 等(1987)对加拿大 Athabasca 沥青砂岩油藏进行了时移地震监测注气效果的先导试验工作; Mishr (1988)对印度北坝贝盆地进行了时移地震试验,用于提高油田的采收率; 1987年 G. A. King 等通过野外试验证实了注水地面地震监测的可能。与此同时在时移地震理论研究方面也取得了较大的进展。White 和 Sengbush 在其专著《开发地震学》中对开发地震技术和方法进行了系统的总结,并初步建立了开发地震学的理论框架; 布尔贝(1987)在其专著《孔隙介质声学》中对多孔隙介质波的传播理论进行了深入研究,进一步丰富了开发地震学的理论。Sheriff (1992)主编了《储层地球物理学》,书中详细介绍了储层地球物理方法及发展现状。在80年代中后期和90年代初期, Nur 和王之敬等人做了大量岩石物理性质的实验研究,为时移地震的发展奠定了岩石物理实验的理论基础。

进入20世纪90年代,特别是90年代后期,时移地震得到了空前的发展。世界上大多数石油公司相继开展了时移地震试验工作。Grabens 和 Johnstad (1993)应用时移地震研究了挪威海上油田监测过程中 Dseberg 油田气顶运动规律; Johnstad (1994)和 Kalantzis (1996)分别研究了加拿大阿尔伯塔冷湖油田稠油蒸汽热采监测的时移地震资料; Lumley (1994)对北海某油田溶解气驱开采过程中时移地震监测可行性及可靠性进行了研究; Anderson 等(1995)阐述了应用时移地震监测已部分枯竭的 Eugene Island Black 330/338 油田中流体及地层压力的变化,该油田综合利用三次三维地震勘探成果重新钻探后又焕发了新的生机。截止到1997年10月,全世界时移地震工程共56个(Anderson, 1997; Jack, 1998等)。仅1997年全球用于时移地震的费用就达到5亿美元,占当年地震勘探费用的1/7。预计到2005年,全球时移地震费用将达到35亿美元。在1997年SEG年会上发表的时移地震研究论文达到18篇; 1998年北京CPS/SEG/EAGE国际地球物理研讨会上有关开发地震的论文达到25篇; 1998年SEG在其主要刊物THE LEADING EDGE(《前缘》)第4期刊出了开发地震专辑,在第10期刊出了时移地震论文专辑。在THE LEADING EDGE 1998年第10期时移地震论文专辑中, J.Meunier 等介绍了巴黎盆地一含水砂岩注气前后三次地震勘探(1993, 1994, 1995)的地震响应变化; Daniel J. Talley 等介绍了科罗拉多矿业学院储层特

征描述组 (CRP) 开发的 4D、4C 技术及其在墨西哥 Vacuum 油田的应用研究成果, 该成果展示了利用多分量时移地震技术确定各向异性和渗透率的能力; Biondo Biondi 等介绍了储层监测中多学科之间的协作模式, 他将地质储层建模、流体流动建模、岩石物理建模和地震建模纳入储层监测统一管理; Rogzr N. Anderson 描述了将时移地震同三维弹性地震模拟、储层描述以及流体流动模拟结合起来解释油、气、水的排泄模式, 并识别滞油区; David H. Johnston 等研究了利用常规时移地震数据对北海 Fulmar 油田进行油藏内流体运移和压力变化监测的潜力, 该油田有两套三维数据集, 一套是生产前 (1977) 采集的, 另一套是生产 10 年后 (1992) 采集的, 采油方式为注水开采, 目前含水率达到 90%, 与大庆油田较为相似; Lloyd R. Weathers 等研究了利用老的二维地震和新的三维地震之间的时移地震监测问题, 这也是中国大多数油田具有的实际情况。该专辑在一定程度上反映了目前时移地震研究现状和水平。这些充分说明了时移地震的美好发展前景。

国内的时移地震研究起步较晚, 胜利油田于 1988 年首次在单家寺地区进行了蒸汽吞吐与蒸汽驱稠油热采地震监测试验 (王新红等, 1992)。之后, 新疆石油管理局于 1993 年至 1995 年也进行了时移地震监测稠油开采的先导性试验 (孔智勇, 1997, 1998), 辽河油田对千 12 块 Q64-54 井区进行了时移地震监测 (王丹, 1998)。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, 这方面的主要成果有: 《利用地震信息进行油气预测》(刘企英, 1994)、《油气田开发地震技术》(刘雯林, 1996)、《储层地球物理学》(牟永光, 1996)、《油田开发应用地球物理》(蔺景龙等, 1996)、《储层预测技术研究新进展》(傅长生, 1998)、《开发地震》(石油勘探开发研究院等, 1999)、《地震属性分析与四维地震方法研究及应用》(庄东海, 1999)。国内专门针对注水地震监测的研究很少, 林蓉辉 (1994) 与 Amos Nur 和 Li Fang (1994) 首先提到了在大庆油田和胜利油田开展注水地震监测的重要性。云美厚 (1997, 1998) 借助于 Gassmann 方程, 对含不同油气比原油的高孔隙储层注水地震监测的可行性进行了理论模拟分析; 之后又对薄互层油藏注水地震监测的可行性进行了初步的研究 (云美厚等, 1999)。庄东海 (1999) 也进行了部分注水地震监测的模型模拟研究工作。在岩石物理实验方面, 由国家自然科学基金资助的“八五”重大项目《陆相薄互层油储地球物理理论与方法》率先针对大庆油田进行了储层条件下油储岩石物性的测量与研究。之后, 许多人分别针对胜利油田、塔里木盆地、济阳凹陷、准噶尔盆地等不同地区、不同种类的岩石进行了不同程度的岩石物理实验研究 (王新红等, 1994; 李爱兵等, 1994; 刘祝萍等, 1994; 施行觉等, 1996; 白尤军等, 1996; 韩文功等, 1997; 黄凯等, 1998)。

时移地震监测的是储层中流体的流动, 只有当储层的综合地震响应在地震分辨率范围内存在差异时, 才能有效地应用时移地震技术进行油气藏监测。由于时移地震数据采集的时间、环境及方法不同, 使得地震数据存在非地质因素引起的差异, 因此, 时移地震数据的一致性和可重复性是油气藏监测成败的关键, 也是我国学者要研究的重要课题。

目 录

第一章 时移地震概述	(1)
第一节 时移地震的概念	(1)
第二节 时移地震研究的前提	(2)
第三节 时移地震基本研究方法	(5)
第二章 时移地震研究的理论基础	(9)
第一节 Gassmann 理论及其扩展	(9)
第二节 储层参数与地震参数的转换	(12)
第三节 岩石物理实验结论及机理分析	(15)
第三章 注水地震监测模型模拟研究	(24)
第一节 孔隙流体的地震特性	(26)
第二节 干岩石骨架模量分析	(32)
第三节 注水地震监测模型模拟研究	(35)
第四节 固结砂岩油藏注水地震响应	(43)
第五节 信噪比与分辨率对注水地震响应的影响	(49)
第六节 调谐与薄储层油藏注水地震监测	(56)
第四章 时移地震资料处理方法	(64)
第一节 时移地震资料归一化问题及处理原理	(64)
第二节 时移地震资料归一化处理方法	(65)
第三节 时移地震资料归一化处理实例	(66)
第五章 地震—测井资料匹配校正方法	(79)
第一节 速度频散理论基础	(79)
第二节 测井—地震匹配方法研究	(81)
第三节 地震与测井速度之间的差异	(88)
第四节 实际观测结果分析	(92)
第五节 测井与地震匹配效果分析	(94)
第六章 时移地震资料解释	(97)
第一节 直接分析法	(97)
第二节 地震属性分析法	(98)
第三节 动态储层描述方法	(100)
第四节 时移地震资料实例分析	(102)
后记	(110)
参考文献	(112)

第一章 时移地震概述

20 世纪 80 年代以来,不少西方石油公司在发现老油田开采难度越来越大时,针对如何提高采收率、发挥老油田的最大潜力的课题开展了很多卓有成效的试验及研究工作,他们在油田区重新进行三维地震勘探后发现现有的地震响应与开采前进行的地震勘探资料有明显的不同,利用这种差异可有效地研究油田自开发以来流体的运动规律。地震响应在时间上的这种差异——时移地震特征为地震勘探开辟了一个崭新的研究领域。

1980 年以前,二维地震勘探使油气储量的采收率达到 20%~30%。80 年代三维地震的广泛应用不仅在勘探领域发挥了巨大作用,而且已成功地应用于开发领域,从提供精确的构造图发展到精细油气藏描述,三维地震的应用使油气的采收率提高到 30%~40%。全新的油藏管理方法不仅可揭示油气藏的三维特性,而且充分利用地震响应在时间上的差异信息,经过测井资料和开发史资料的标定,可识别出剩余油位置,为优化开发方案、减少干井提供宝贵资料。专家预测,时移地震方法的应用可望在 21 世纪使油气储量采收率得到进一步的提高。

第一节 时移地震的概念

时移地震是 20 世纪 70 年代中期产生、90 年代得到飞速发展的一种现代油气藏动态管理方法。它是利用不同时间测量的地震数据属性之间的差异变化来研究油气藏特性的变化。每隔一定时间进行一次地震测量(二维或三维),对不同时间观测的数据进行归一化处理,使那些与油气藏无关的地震响应具有可重复性,保留与油气藏有关的地震响应之间的差异,通过与基础观测数据的比较分析,用来确定油气藏随时间的变化规律。然后综合利用岩石物理学、地质学、油藏工程资料,对油气藏及时进行动态监测,快速进行油藏评价,达到调整开发方案、提高油气储量采收率的目的。

时移地震是英文“Time-lapse seismic”的中译文。目前关于这一外来语的译法很多。在 1999 年 4 月发行的《石油物探译丛》第二期时延地球物理专辑中,将其译为时间延迟地震(简称时延地震)。而在 1999 年 5 月由中国石油学会物探专业委员会举办的短期培训班教材中,则将其译为时移地震(简称时移地震)。也有人将其译为延时地震。从意义上讲这些译法并没有多大的不同,但笔者认为有必要将其统一起来,否则名称太多太乱。笔者比较同意第二种译法。因为单从字面理解,“时延”或“延时”均强调了时间的延续性和连续性,而“时移”则表明时间向前推移,这种推移可以是连续的也可以是跳跃的,较符合时移地震时间变化的特点。

此外,由于大多数情况下,时移地震都是通过重复多次三维地震测量进行的。因此国内外许多学者也将其称为四维地震,这种叫法虽然形象,但并不贴切。一方面,与其它三维相比,第四维——时间维的采样间隔太长,且采样点较少,还不能构成真正的第四维。另一方面,除三维时移观测外,还有许多其它的时移观测方法(如时移二维地震,时移 VSP 等),因此,四维地震并不能代表时移地震的全部。换句话说,不论从概念的内涵和外延来讲,四

维地震都不等于时移地震，其只能被视为是时移地震的一个组成部分或分支之一。

在现行的油藏管理中，监测油藏流体运移的方法仅仅局限于井筒测量，这些监测方法很多，包括压力测试、采油速度、注入速度、油水比、油气比、生产测井、地层测试等，这些方法的特点是采用井间内插，远离井筒时精度有限。时移地震可在一定程度上弥补上述不足。

时移地震的主要目的在于分析研究油气藏开采过程中造成的储层流体运动、流体成分变化、流体饱和度变化、压力变化、孔隙度和温度变化等油气藏特性的变化所引起的地震响应的变化，并由地震响应的变化反演油气藏特性的变化。其主要作用是：

(1) 寻找死油区，确定加密井或扩边井井位。

(2) 监测注入流体（如水、蒸汽、 CO_2 等）的流动方向和前缘位置，调整开采井和注入井井位。

时移地震有多种方法，按观测方式可分为：

(1) 时移三维地震，常称四维地震。它是目前较常规的时移地震方法，也是时移地震最先使用的方法。它的成本最高，效果也最好。

(2) 时移二维地震，常称重复地震。它是近几年发展起来的方法，其特点是成本低，易实现，效果也较好。

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

(4) 井间时移地震，它是利用重复井间地震方法来实现油藏动态管理的。

第二节 时移地震研究的前提

时移地震的主要目的在于分析由于注入流体和开采而造成的流体运动、流体成分变化、流体饱和度变化、压力变化、孔隙度变化和温度变化等油藏特性的变化所引起的地震响应的变化。并由地震响应的变化反演油藏特性随时间的变化，以便合理调整开发方案，提高油藏采收率。然而，由于注采所造成的地震响应的变化，因油田而异，因储层而不同。只有储层的所有变化的综合效应在给定的地震分辨率范围内存在稳定可信的地震差异时，时移地震才可得到成功地应用。换句话说，时移地震的实施对储层条件、注采方式，以及地震方法本身都有不同的要求。

一、储层条件

时移地震并非适用所有的储层，要进行时移地震监测，油藏本身必须满足特定的条件。

表 1.2.1 给出了各种可能的储层参数并简要分析了其对时移地震监测的影响。相比之下，低骨架弹性特征是时移地震监测得以实现的第一必要条件；孔隙流体压缩系数的明显差异是时移地震成功的第二必要条件；孔隙流体可压缩性差异较大的几种情况见表 1.2.2。

由此可见，适于时移地震监测的较为理想的油藏条件是：孔隙度要大（ $>25\%$ ），岩石要疏松；埋藏深度要浅；厚度要大；原油的油气比要高；流体饱和度变化要大等。

二、注采方式

尽管储层地震特性的变化与开发/开采过程有关，但并不是所有的采油过程都能进行地震监测。因此，充分认识开采过程与储层地震特性之间的关系，了解采油方式引起油藏特性的变化对时移地震监测的实施显得非常重要。

在一次采油过程中，油藏压力下降有时是很明显的，这会使储层岩石骨架应力增大，进

表 1.2.1 有利于时移地震实施的储层参数分析表

参 数		说 明
静 态 参 数	埋 深	浅层比深层有利。浅层岩石固结性差，孔隙度高，孔隙流体变化影响大。且浅层地震资料质量好，分辨率高
	泡 点	指特定温度下，溶解气开始汽化的压力，地层压力大于泡点压力时原油因溶解气含量高，压缩系数大，孔隙流体差异大
	储层厚度	厚度越大越有利，最小厚度应不小于半个地震波长
	岩 石	未固结或固结较差、具有连通裂缝或张裂缝、孔隙纵横比较小、粒间接触或弱颗粒连接均有利
	上覆地层压力	低上覆地层压力对应于低骨架应力，储层物性参数受流体饱和度和地层压力变化的影响较大
动 态 参 数	孔 隙 度	孔隙度高时，孔隙流体变化相对于岩石骨架变化来说，要比低孔隙油藏明显
	渗 透 率	渗透率决定了流体的流动性。低渗透储层不利于流体的移动，地震特征变化较小，稳定而均匀分布的渗透率较有利于监测
	干岩石体积模量	具有低骨架弹性特征的岩石称为软岩石，其孔隙度一般均较大，孔隙流体变化能引起地震特性的明显变化
	气 油 比	含高气油比原油速度、密度较低，孔隙流体差异较大
	流体饱和度	开发初期的饱和度与要监测的饱和度的比越大越好
	流体可压缩性	孔隙流体可压缩性差异越大越好
	温 度	温度改变将引起岩石骨架和孔隙流体特性的变化。高温时油比水更易于压缩，对监测更有利
	孔隙流体压力	高孔隙压力可使原油溶解较多的气，使孔隙流体差异增大
	阻 抗	显示上述各因素的综合效应，阻抗变化越大越好

表 1.2.2 孔隙流体可压缩性差异较大的几种情况（据 Wang, 1997）

储层流体	变化	储层流体
液体（油、水）	↔	气
油/水	↔	CO ₂ （液体或气）
活 油	↔	水/淡水
油	↔	高矿化度盐水
活 油	↔	死 油
低温油	↔	高温油

而引起岩石速度、密度增加，时移地震应当有能力监测油藏衰竭过程。

在注水或水驱过程中，如果油是轻油或活油，油与水之间的压缩系数之差较大，有利于时移地震的实施；如果储层孔隙中含的是重油或死油，其与水压缩系数之差较小，这将不利于监测的实施。

在热采（注蒸汽、火烧）过程中，随着储层温度的增加，孔隙流体粘度降低，岩石和孔隙流体的压缩系数增加，从而导致岩石速度、密度的明显降低。特别是对于浅层稠油热采，时移地震监测几乎总是可行的。

在溶解驱和非溶解驱开采过程中，由于注入流体（CO₂ 或气）的可压性远远高于储层流体的可压性，且注入流体使得孔隙流体粘度减小，并驱替了原始孔隙流体，时移地震的监测应当是可行的。

当注入压力和注入速度较高时，可能导致岩石破裂，引起速度的明显改变。特别是当裂隙定向排列时，利用横波分裂可以圈定裂缝发育区。

由此可见，时移地震适用于水驱和溶解气驱，且水驱采油最好是轻油或气；热驱采油应当是重油。在碳酸盐岩地区，时移地震适用于气驱、CO₂ 驱、蒸汽驱和溶解气驱储层。

三、地震条件

当油藏特性、注采方式均满足监测条件时，地震资料质量的好坏直接决定了时移地震监测的成败。表 1.2.3 列出了时移地震监测对地震资料的限制条件。

表 1.2.3 时移地震监测得以实施的地震条件

参 数	要 求
地震成像质量	叠加或偏移信噪比高 (>1)；油藏反射成像清晰；油藏振幅可靠和有意义；油藏反射未受多次波和相干噪声污染；油藏反射未被浅层气、静态时移或速度异常弄模糊
地震分辨率	震源主频要高。油藏厚度至少等于半个地震厚度分辨率（分辨率等于 1/4 波长）；若在 4 倍地震分辨率以上最好
地震流体界面	至少应有一个地震流体界面是可见的；若全部界面均可在平面作图为最好
地震可重复性	采用同样的采集设备观测；使用永久性震源和检波器排列装置；按规范标准精确定位；按相同的方向放炮；每次采集都用同样的面元、炮检距和方位角分布
阻抗变化	应当大于 4%（经验法则）
旅行时变化	应当大于 4 个时间采样间隔（经验法则）

在上述地震参数中，地震资料的可重复性是时移地震所面临的主要困难之一。时移地震监测要求不同时间采集和处理的地震资料要有一致性或可重复性。不一致或不重复的部分应当是由油藏引起的真变化，不是采集处理制造出来的假变化。但实际上两次采集很难保证完全一致。地下水位的变化会造成地表条件的不一致，环境的变化会造成环境噪声的不一致，震源形状、瞬时位置或放炮方式的不精确会造成能量分布的不一致，采集仪器的不同会造成不同的仪器噪声和不同的频谱特征，观测系统的差别会导致两个数据体难以比较等等。所有这些不一致都会造成反演结果之间的差异可能仅代表噪声而无实际物理意义。特别是由于技术的进步，新的重复地震不可能与原有的地震采用同样的采集、处理参数。一句话，不一致是绝对的，一致是相对的。这就决定了时移地震监测必须在采集、处理上下大功夫，使得由于各种非地质因素引起的不一致降低到最小的限度。

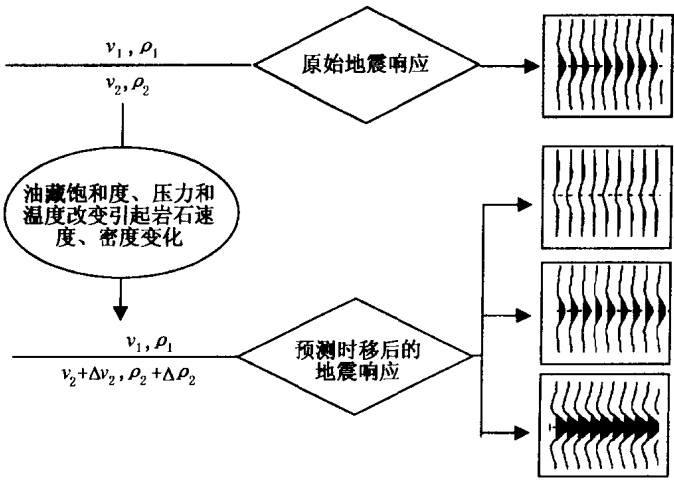


图 1.2.1 油藏特征的改变引起地震特征变化示意图

此外，由于注入和开采而造成的储层差异是否能引起稳定而可信的地震差异是时移地震监测所面临的又一主要困难。地震所观测的是油藏与盖层（或围岩）的波阻抗差异，波阻抗又是密度、速度的乘积。因此，地震反射是速度、密度的函数。由于注采而引起的油藏变化最终都将反映到油藏的地震波速度和密度的改变上，从而引起地震反射特征的变化，如图 1.2.1 所示。只要这一变化特征足够大，地震能观

测到，就可以通过时移地震监测油藏流体的改变。这就要求地震资料必须有足够的分辨率、信噪比和较高的保真度。

时移地震是地震技术在时间上的延伸。其要求以适当的时间间隔对同一油气藏进行多次地震测量。为了研究地下储层流体变化所引起的时移地震资料的差异，时移地震资料必须在非储层范围内（特别是储层之上）要具有重复性或一致性。重复性是时移地震技术成败的关键。尽管相邻两次地震资料的采集处理方式可以一样，但由于一些非储层因素（如地下激发条件、地面环境等）的变化，会使两次测量在非储层范围内的地震特征有差异。因此，时移地震资料总的要求是相对振幅保持处理、高信噪比处理和一致性处理，其中一致性处理的难度最大，也是关键。

第三节 时移地震基本研究方法

时移地震的研究方法大体上可分为三个部分，即可行性研究、现场先导试验和油田大规模应用。

一、可行性研究

时移地震应用难度很大，在项目实施前，必须进行技术风险分析，对其实施的可行性进行认真的评价。可行性研究一般包括两个方面的内容：一是时移地震监测的适用性或称为技术风险评价；二是时移地震监测的经济有效性。前者主要是通过对油藏特性、注采方式和地震资料本身的分辨率、信噪比、可重复性等的分析与评价，以确定所研究的油藏是否适合用时移地震方法进行监测。后者则是对时移地震监测能否在油藏开采中获得良好的回报率的评价。即由于监测提高油藏采收率而获得的费用是否可偿付时移地震监测的费用。只有当因监测提高采收率的费用高于地震监测的费用才是经济有效的。目前，关于时移地震监测的适用性的研究做得较多，而对于经济有效性的评价做得相对较少。

1. 技术风险评价

从上一节的分析已经知道，时移地震对油藏条件、开采方式和地震资料的质量都提出了相应的要求。因此，进行时移地震适用性的分析或评价就必须从这三个方面入手加以讨论。

表 1.3.1 为时移地震可行性定性评价参数表。该表几乎包括了所有的油藏参数和地震参数，表中“理想值”一栏归纳出定性评价可行性的结论。

表 1.3.1 中旅行时变化和阻抗变化需要通过改变所有预期的饱和度、压力和温度条件，包括油藏开采的影响在内，用地震模型模拟来做出预测。

为了使时移地震可行性分析定量化，通过对国外时移地震实例的分析，表 1.3.2 和表 1.3.3 选择了油藏参数和地震参数中最关键的参数，并对每个参数制定出评分标准，分数按 0~5 分计算。表 1.3.4 为时移地震技术风险定量评价表。按照表 1.3.2 和表 1.3.3 的评分标准分别计算各项的分值，然后根据所有各项的总分值的大小来定量评定时移地震的可行性。表中右端 4 列数据是对来自雪佛龙石油公司在印度尼西亚、墨西哥湾、西非和北海的时移地震项目的定量评价实例。

需说明的是，对于给定的采油方式，可在阻抗变化与旅行时变化两项中任选一项即可。但当油藏厚度不大时，旅行时变化往往不会太明显，此时可选阻抗变化作为评价参数。

在可行性分析（或称风险评价）中，油藏条件必须首先获得一个通过，分数一般取通过分数的门限值为满分的 60%。对于上表 25 分的满分值，通过分数必须超过 15 分。从表中

表 1.3.1 时移地震可行性定性评价参数表

参 数		理想值	参 数		理想值
油 藏	深度 (m)	浅	地 震	主频 (Hz)	高
	上覆岩层压力 (MPa)	低		分辨率 (m)	高
	孔隙压力 (MPa)	高		成像质量 (信噪比和保真度)	高
	有效压力 (MPa)	低		可重复性	高
	泡点 (MPa)	低		流体界面可视性	高
	温度 (°C)	高		预测的旅行时变化 (样点数)	>4
	单元厚度 (m)	高		预测的阻抗值变化 (%)	>4
岩 石	干岩石体积模量 (GPa)	低	水	含盐度 (10^{-6} g/g)	高
	干岩石密度 (g/cm^3)	低		密度 (g/cm^3)	高
	孔隙度 (%)	高		体积模量 (GPa)	高
	渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	高			
原 油	气油比 (m^3/t)	高	气	密度 (g/cm^3)	低
	重度 (API)	高		体积模量 (GPa)	低
	密度 (g/cm^3)	低	时 移 流 体	流体饱和度变化 (%)	高
	体积模量 (GPa)	低		流体压缩系数变化 (%)	高

表 1.3.2 油藏评分标准

分 数	5	4	3	2	1	0
干岩石体积模量 (GPa)	<3	3~5	5~10	10~20	20~30	>30
流体压缩系数变化 (%)	>250	150~250	100~150	50~100	25~50	0~25
流体饱和度变化 (%)	>50	40~50	30~40	20~30	10~20	0~10
孔隙度 (%)	>35	25~35	15~25	10~15	5~10	0~5
阻抗变化 (%)	>12	8~12	4~8	2~4	1~2	0
旅行时变化 (采样点数)	>10	6~10	4~6	2~4	1~2	0

表 1.3.3 地震评分标准

分 数	1	1	1	1	1	0
地震成 像质量	叠加或偏移信噪比 高	油藏反射层反射清 晰	油藏振幅可靠有意 义	油藏反射未受多次 波或相干噪声污染	油藏反射未被浅层 气、静态时移或速 度异常弄模糊	条件 均不 成立
地震可 重复性	采集设备相同 同	永久震源检波器排 列	精确定位	放炮方向相同	同样的面元、炮检 距、和方位角	
分 数	5	4	3	2	1	0
地震分 辨率	$< \frac{1}{4} H$	$\frac{1}{4} H \sim \frac{1}{3} H$	$\frac{1}{3} H \sim \frac{1}{2} H$	$\frac{1}{2} H \sim H$	$H \sim 2H$	> 2H
地震流 体界面	全部均可在平面成 图	有若干个界面可在 平面成图	有一个可在平面成 图	有若干个界面可见	至少有一个界面可 见	不可视

注: H 表示油藏厚度; 地震分辨率 = $1/4$ 波长。

表 1.3.4 时移地震技术风险定量评价表

参 数		理想分	实 例			
			印尼	墨西哥湾	西非	北海
油 藏	干岩石体积模量	5	5	4	3	2
	流体压缩系数变化	5	5	4	3	4
	流体饱和度变化	5	5	5	4	3
	孔隙度	5	5	4	4	3
	阻抗变化	5	5	4	3	3
	油 藏 总 分	25	25	21	17	15
地 藏	成像质量	5	4	5	4	3
	分辨率	5	5	4	3	1
	流体界面	5	4	4	4	2
	可重复性	5	5	4	4	2
	地 震 总 分	20	18	17	15	8
总 分		45	43	38	32	23

实例可以看出：印尼获得一个满分 25 分，这是因为它是一个高孔隙未固结的砂岩重油油藏，且采用蒸汽驱采油。墨西哥湾获得一个乐观的打分 21 分，那里的岩石是高孔隙度未完全固结的砂岩，采用水驱采油，活油与重水之间的差异较明显。西非和北海的岩石是含碳酸岩成分高的固结岩石，刚刚满足油藏门限分数。

当油藏条件通过门限分数时，便可进行地震参数评分。地震条件同样也必须通过满分 60% 的门限，即对于 20 分的满分，必须超过 12 分。对于印尼实例，由于其在地震采集使用了固定震源和检波器装置，且采用小药量炸药震源激发和井中检波器接收，最终获得了高达 250Hz 的高频反射，地震分值接近理想值 18 分。墨西哥湾使用海底检波器接收，频率高达 100Hz，且多个油藏流体界面反射能在平面追踪，因而得到了一个较高得分 17 分。西非的例子也通过了门限值。但北海实例，因炮线偏差 30℃，定位精度低，未能通过地震分数门限 12 分。

在各项条件评定完成后，需进行综合评价。在上述实例中，印尼的高分表明进行时移地震监测是非常有利的。实际监测完全证明了这一点。墨西哥湾的总分表明，油藏和地震条件也是很有利的。西非实例的油藏条件虽然比理想值要差，但其地震条件还是好的。正因如此，西非近海时移地震项目仍取得了令人鼓舞的结果。北海项目的地震拖缆采集和深层固结油藏条件对时移地震监测都是不利的，地震表现出的看来是有意义的细微变化不易与噪声区别。

2. 经济有效性评价

由于评价时移地震监测的经济效益是一项非常复杂的活动，所用方法不同得出的结论可能完全相反。因此应当尽可能简单地考虑这个问题。根据偿付监测成本所需要的额外产量来评价监测的经济有效性也许是一种可行的方法。具体做法概述如下：

首先核算油藏监测中所有与资料采集处理和解释有关的成本。然后根据市场原油价格将所有成本折算为所需原油额外产量。最后根据油藏储量计算采出相当于监测费用的额外产量的原油所需提高采收率的最低值，若监测可使得油藏采收率提高的幅度大于偿付监测费用所

需的采收率，则监测是经济有效的。由于技术进步和油价的变化，使得经济有效性评价变得非常复杂，它是时间的动态函数。

经济有效性评价是在保证监测顺利实施的前提下，使时移地震监测能以最经济合理的方式实现，以便获得最大的经济效益。

二、现场先导试验

将可行性研究中所确定的一整套参数和方法用于油田中具有良好前景的储层，这样既可提供最好的机会来精细地了解时移地震的效果，又可减少资金投入的风险。目前，时移地震监测的成功实例都集中在“现场先导试验”阶段。这一阶段着重进行资料重复性的研究工作，同时还要对地震资料的成像质量、旅行时变化和波阻抗变化进行分析，最终确定合理而有效的时移地震采集、处理 and 解释方法，为时移地震的大规模应用奠定基础或提供指导。

三、油田大规模的运用

将现场先导性试验所获得的一整套有效参数和方法应用于整个油田，这样无论从技术观点出发还是从经济观点出发，其成功的可能性都大大地增加了。一方面，先导试验为其降低技术风险提供了保障；另一方面，时移地震的大规模应用使得监测费用可以均摊在整个油田生产期，从而使得监测成本相对地减少了。

由于时移地震是为油藏管理服务的，而油藏是处于动态的，所以时移地震必须对新的信息有快速分析和响应的能力。也就是说，时移地震必须具有快速采集、处理和解释的能力。慢了就没有任何用途了。时移地震需要处理大量的地球物理的、地质的和油藏工程的数据，因此，在油田大规模运用时，必须有一套与之相适应的处理软件系统。同时还要求地球物理学家、地质学家和油藏工程师的密切配合。另外，时移地震要求采用可视化技术，以实现解释结果的可视化。