

油气地球物理技术 新进展

—— 第 84 届 SEG 年会论文概要

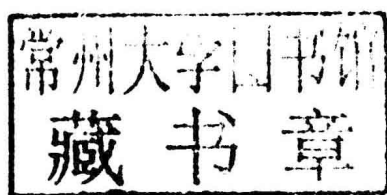
中国石化石油物探技术研究院 编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

油气地球物理技术新进展

——第 84 届 SEG 年会论文概要

中国石化石油物探技术研究院 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据 2014 年美国勘探地球物理学家学会 (SEG) 第 84 届年会论文详细摘要分专题编写而成。内容包括: 地震勘探理论研究、地震岩石物理技术、非常规岩石物理技术、地震数值模拟技术、地震数据采集技术、近地表问题研究、地震噪声衰减技术、地震数据插值与规则化技术地震波偏移成像、偏移速度分析、地震反演技术、全波形反演、各向异性介质偏移成像及反演成像研究、AVO 反演与属性提取技术、地震解释技术、储层表征和油藏描述技术、非常规储层表征技术、微地震监测技术、时延地震技术、井中地球物理技术、多分量地震技术等。本书基本反映了近年来油气地球物理技术的最新进展。

本书可供从事地球物理勘探技术研究和应用的专业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气地球物理技术新进展: 第 84 届 SEG 年会论文概要/
中国石化石油物探技术研究院编. —北京: 石油工业出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5183-0931-3

I. 油…

II. 中…

III. 油气勘探-地球物理勘探-学术会议-文集

IV. P618. 130. 8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 244805 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: 北京晨旭印刷厂

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 21.25

字数: 540 千字 印数: 1—1000 册

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

《油气地球物理技术新进展
——第 84 届 SEG 年会论文概要》
编 委 会

主 任：曲寿利

副主任：杨勤勇

编 委：赵改善 胡中平 吕公河 曹 辉 关 达
方伍宝 王世星 魏 嘉 王咸彬 严建文
高 林 张卫华 黎 娜 陈 伟

目 录

地震勘探理论研究	高 林 (1)
地震岩石物理技术	李 琼 陈兴华 曹 辉 (9)
非常规岩石物理技术	李呈呈 (22)
地震数值模拟技术	周辉 陈汉明 (37)
陆上地震数据采集技术	何京国 段卫星 崔汝国 (49)
海上地震数据采集技术	于富文 何京国 段卫星 崔汝国 (62)
近地表问题研究	孙晶梅 (81)
地震噪声衰减技术	高艳霞 刘 晨 (94)
地震数据插值与规则化技术	刘 伟 (106)
地震波偏移成像 I	王雄文 王华忠 (124)
地震波偏移成像 II	王华忠 (138)
偏移速度分析	王华忠 (154)
地震反演技术	印兴耀 (172)
全波形反演	胡光辉 (193)
各向异性介质偏移成像及反演成像研究	周 阳 王华忠 (202)
AVO 反演与属性提取技术	滕 龙 罗 亨 (215)
地震解释技术	周小慧 (231)
储层表征和油藏描述技术	黎 娜 (245)
非常规储层表征技术	文晓涛 熊晓军 周怀来 (262)
微地震监测技术	李宏 程磊磊 郭全仕 (273)
时延地震技术	陈 伟 (292)
井中地球物理技术	李 霞 张荣忠 (306)
多分量地震技术	王 赟 (325)

地震勘探理论研究

高 林

中国石化石油物探技术研究院

一、引言

第 84 届 SEG 年会有关地震勘探理论研究的论文较少，主要集中于地震干涉、分辨率和二维模拟几个方面。地震干涉技术主要用于解决近地表问题和提高地震成像的精度。本届年会有关地震干涉方面研究的文章仍以提高地震成像精度为主，并向各种复杂介质（如弹性介质、多孔介质和裂缝介质等）的精确成像与定位问题拓展。超分辨率是一个新概念，近年来，人们在不断挖掘和利用数据中的信息（包括噪声）提高成像质量的同时，也在想方设法逾越传统的分辨率概念，提高成像精度。地震模拟研究仍然集中于通过正演模拟改进反演效果，以及用正演手段增强地震资料处理能力和提高处理结果的质量等方面。

此外，在地震波速度分析、各向异性研究和被动源地震等领域，理论研究受到高度重视。地震速度分析仍然以偏移速度分析为主，用 FWI 指导偏移速度分析和各向异性建模是研究热点。各向异性研究则主要围绕裂缝介质进行偏移成像和参数反演。被动源地震理论很受一些知名研究机构（如科罗拉多矿院、斯坦福大学和 Delft 科技大学）的重视，研究内容涉及微地震事件的定位与成像等方面。

二、地震干涉学

1. 地震干涉学与自动聚焦

近年来，一项称为自动聚焦（亦称 Marchenko 基准面重建法）的新颖技术被用来构建地下虚源的声学格林函数。这种虚源位置上的自动聚焦不需要震源和接收器，仅需要由反射数据和从虚震源到接收器的直达波至估计值组成的单侧数据。反射数据可以通过地面常规采集获得，直达波至可由地下速度的平滑估计结果求取。目前，声学自动聚焦在理论上可通过数值方法实现，包括从介质内虚震源恢复反射真振幅的数值驱动方法。

许多学者已注意到在逆时声学和地震干涉学之间存在着紧密联系。最近又发现在地震干涉学和自动聚焦之间也有联系。Delft 科技大学的学者与 Schlumberger 的研究人员共同探讨了这些方法在聚焦条件方面的细微差异，提示了对应于聚焦波场的因果/非因果问题，以及有关全向/单侧采集的要求。研究表明，逆时声学、地震干涉学和 Marchenko 成像方法非常相似，但各自的聚焦函数存在差异。

逆时声学的前提是可以从所有侧面进入被调查的介质，通过将界面上观测到的逆时响应发射回介质中，在原始震源位置上聚焦。这种聚焦称为 I 型聚焦。实践中，由于介质通常只能从一侧进入，这就意味着在声波旅行时 $t=0$ 时，除期望的焦点外，还会出现其他焦点。

标准地震干涉学的前提条件与逆时声学相似，因此也存在单侧采集情况下类似的局限性。业已证明，单侧采集时，地震干涉学聚焦算子在理想情况下可表达成传输响应的逆，与逆时聚焦算子中的非因果结尾相反。反向传输响应的结尾是因果的（适用于一维情况，但对三维不严格成立）。这种反向传输响应聚焦称为Ⅱ型聚焦。单侧Ⅱ型聚焦正确地考虑了多次散射，在用多维反褶积实现的地震干涉学中得到广泛应用。由此，可测量传输函数。

在 Marchenko 成像中，反向传输响应是从反射数据中提取的，是直达波的估计结果。在这两者的应用中，都利用了格林函数的分解，从而能在成像过程中正确地考虑多次反射。当将分解格林函数的方案结合起来时，我们就又获得了Ⅰ型聚焦，但借用了带非因果结尾的聚焦算子。

在本届年会上，爱丁堡大学的学者将自动聚焦方法推广到弹性固体介质。他们用单程弹性互换原理和扩展型弹性介质聚焦函数，首次推导出弹性动力学波场的自动聚焦，并用二维数值实验在层状致密固体介质中进行了验证，恢复了介质内部潜在源的格林函数。结果显示，源附近的所有同相轴都得到了精确重构。图 1 和图 2 分别为 S 波震源垂直速度分量与水平速度分量的实际数据和重构。S 波自动聚焦结果与 P 波类似，几乎所有反射同相轴（包括层间高阶多次反射）都被精确重构，见图 b 中实箭头。只有首 S 波至到达前的首 S-P 反射（虚箭头）因被切除而未重构。

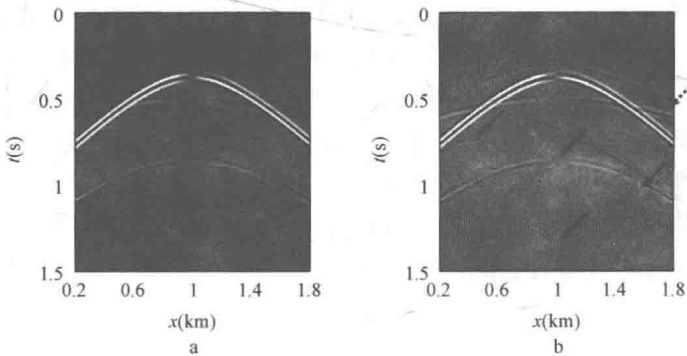


图 1 S 波震源垂直速度分量的实际数据 (b) 和重构 (a)①

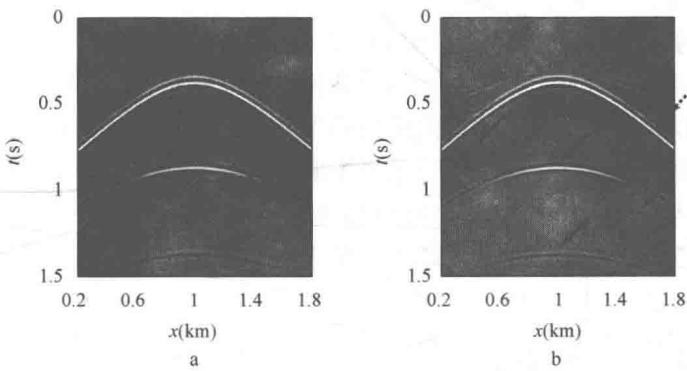


图 2 S 波震源水平速度分量的实际数据 (b) 和重构 (a)

① 本书图件源自 SEG 第 84 届年会论文摘要，对彩色图件和相关参数说明感兴趣的读者请登录 SEG 网站查阅相关原文。

— 2 —

2. 地震干涉法盐下成像

盐丘下方的储层是重要的油气勘探目标。这方面的勘探难题是如何正确确定盐丘翼部的位置,即储层圈闭的边界。这对后续钻井与开发有重要影响。

通常仅用地面地震数据很难使盐丘翼部及其底部边界成像,其主要原因是无法对它们实现合适的照明,尤其在上覆地层复杂的情况下更难做到。垂直地震剖面法(VSP)为调查近盐丘构造模型提供了重要工具。此外,当可获得足够的地面震源照度时,地震干涉技术可以改善VSP接收器记录的反射信号,创造虚源基准面重建。然而,这种方法仍取决于可能的照明条件,有时照明条件可能很差或无法满足叠前干涉互相关所需的稳定条件。用传统的干涉法,或许无助于获得井下检波器间的反射信号,从而无法实现盐丘翼部的合适照明和正确成像,也就得不到勘探所需要的关键信息。

OGS公司的研究人员创造性地采用地震干涉技术进行了盐丘翼部的探测。为了尽可能地掌握盐丘翼部边界成像所需要的信息,他们进行了相关类型的实际盐丘模型研究;为了调查扩展稳定带的条件,他们采用了Poletto等人2012年(EAGE第74届年会论文《采用广义相位法的地震干涉技术》)提出的正切相位干涉法,成功解决了稳定地震干涉条件的扩展问题,进而重构了对应于所选接收器投射点处的反射信息,实现了盐丘翼部同相轴的成像。

在声学介质中,正切相位干涉法的大致意思是,由附近地面 S 上的震源照射的两个接收器 A 和 B 之间的波场在傅里叶频率域可用正切相位表达式积分写成

$$G(B, A, \omega) \approx \int_{S_0} G(B, X, \omega) G^*(A, X, \omega) C(\alpha, X, X_0, \omega) dS$$

式中, $G(B, A, \omega)$ 是接收器 A 和 B 之间的格林函数; X_0 是 S 面上的参考源位置; ω 是角频率;*表示复共轭。在方程中,当常规意义上的稳定条件得不到满足时,可以将积分域限制在面 S 中的一部分 S_0 。像Poletto等讨论的那样, $P=P(X_0)$ 是从 B 点出发,在过 A 点的信号波前上的投射虚点。 C 是相位校正函数; α 是在震源位置 X_0 处求出的正切于互相关曲线的视角。

对于盐丘翼部的探测,可利用方程中从震源 X 到接收器 A 的直达波场 $G_D(A, X, \omega)$,以及从盐丘翼部到接收器 B 的反射波场 $G_R(B, X, \omega)$ 。利用距反射翼部一定距离的井中记录的地震信号,通过时间门限可以合理地分解出这两个波场。这样,上述方程就可以改写成

$$G_R(B, A, \omega) \approx \int_{S_0} G_R(B, X, \omega) G_D^*(A, X, \omega) C_{RD}(\alpha, X, X_0, \omega) dS$$

式中,积分在面源域进行, C_{RD} 是与直达波有关的盐丘反射同相轴的正切函数。研究人员在分析中对同相轴 G_R 和对应的投向点 P 一并做了解释。图3为地面激发,井中相距0.5km的两个检波器接收到的直达射线(白色)和反射射线(黑色)。图3a为单炮激发射线图,图3b为宽度是3km的炮排列激发的射线图。

研究结果表明,正切方位干涉法(TPI)能通过基准面重建的信号来获取由于缺乏照明致使常规地震干涉法无法使用的盐丘翼部的反射。应用过程中需要在干涉求和前对反射同相轴与直达波至互相关中的正切相位进行识别和校正。分析表明,对TPI而言,菲涅尔带是一个重要问题。

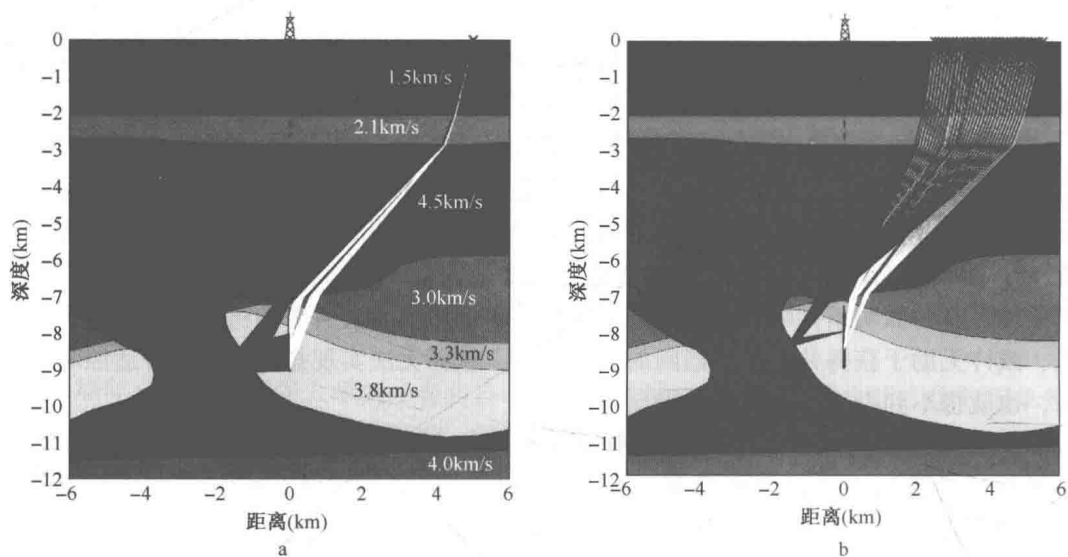


图3 地面激发，井中双检波器接收的盐丘翼部射线图

三、超分辨率地震成像

为了更详细地了解地层细节，地球物理界一直在尝试打破传统的极限，获得更高的地震分辨率。在本届年会上，沙特阿拉伯阿普杜拉国王科技大学的学者 G. T. Schuster 与 Yunsong Huang 从理论上和通过数值模拟证明，只要能够实现谐振多次波的偏移，震源和检波器远场区域的超分辨率成像在理论上是可行的。

谐振多次波是一种在两个散射点或两个相邻反射层之间来回反射的波。对于一个频率为 f 的源，在两个散射体间的 N 次反射会使有效频率增加到 $2N \times f$ ，而有效波长 λ 缩短到 $\lambda/2N$ 。因此，从原理上看，层间多次波可用作估计地层详细特征的高频探头。图4是描述地面上单一源检对在两个散射体之间产生的单次（a）和三次散射（b）。散射同相轴的偏移要求地震道上到达 τ_A 和 τ_B 之间的能量必须分布在笛卡儿椭圆壁的最内圈与最外圈之间。若考虑一次

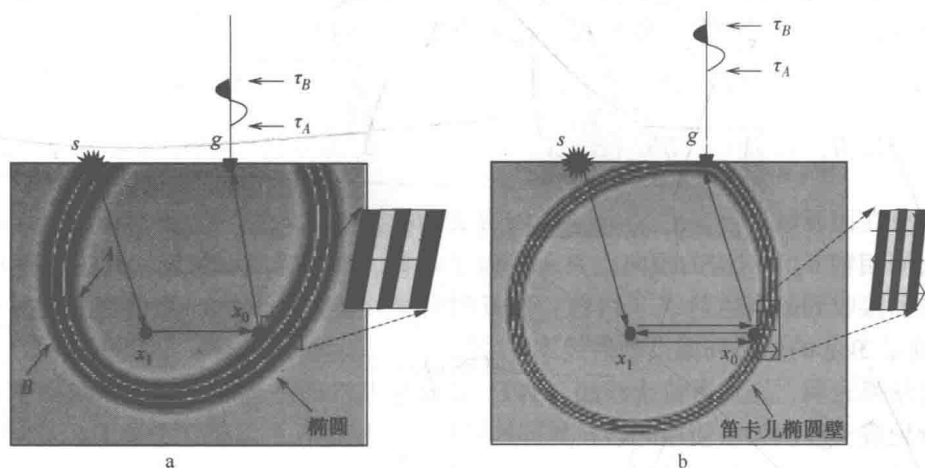


图4 两散射体之间单次散射（a）与三次散射（b）的单道偏移响应

和三次两种散射情况下的时差 $\tau_A - \tau_B$ 相等, 由于三次散射的射线必须三次穿过图 4b 的椭圆壁 (见右侧局部放大图), 因此三次散射椭圆壁应比单次散射椭圆壁薄 3 倍。假定 $\tau_A - \tau_B$ 等于传播一个波长的时间, 则图 4b 中笛卡儿椭圆壁厚就等于 $1/3$ 波长。因此, 削薄偏移带宽可产生更高的成像分辨率。

研究发现, 获得超分辨率的最大挑战是精确估计背景反射系数, 使其精度达到足以实现超分辨率成像。数值模拟结果表明, 用非线性最小平方偏移或全波形反演 (FWI) 有助于实现超分辨率成像。研究者认为, 层间多次波超分辨率成像不仅适用于地壳反射或盐体顶底之间产生的多次反射, 也适用于天然地震学家对地幔和地核混响的研究。

在超分辨率探测方面, G. T. Schuster 还和另一位学者 S. M. Hanafy 研究了近地表散射在提高浅层探测分辨率方面的应用。他们提出用地震扫描隧道放大观测器 (SSTM) 探测近地表阻抗异常和断层。合成数据分析结果表明, 与深层散射体相比, 近地表散射体能产生更强的 SSTM 剖面。如果散射体位于记录测线的近场区域, SSTM 剖面能够实现超分辨率探测。

SSTM 是 Huang 等学者 2014 年提出的用地面反射数据探测近地表阻抗异常的理论。其关键思想是炮点道集可以用作自然格林函数, 这样, 反射能量在未知速度模型的情况下可以自然偏移到记录测线上。在沿测线的偏移剖面 (2012 年 G. T. Schuster 等将该剖面命名为地震扫描隧道放大观测器) 上可用大振幅探测近场散射体。研究者认为, SSTM 剖面上有两种重要特征可用来探测近地表断层。这两种特征是:

(1) 如果在测线附近存在次波长断裂, 那么就可利用其散射波场以超分辨率精度测定断层位置。如果散射能量远弱于直达波能量, 那么直达波的自相关就会使断层模糊不清。

(2) 直达波与散射波至的相关可用来探测记录测线的近场断层。SSTM 偏移剖面上的大振幅意味着较大密度的阻抗异常, 如断崖等。

研究人员在红海亚喀巴湾进行了方法测试。他们用有露头的断层真实地评价了该方法的探测精度。对一些埋藏地下的断层, 层析照片清楚地显示出断层的位置。下一步研究工作是要将记录的格林函数外推到不同深度, 并用它们获取深度偏移剖面。

四、复杂介质研究

复杂介质理论目前的主要研究领域仍然是各向异性介质、弹性介质和孔隙性非均匀介质。本届年会上发表的有关文章对这些复杂介质研究领域的方法提出了一些新的改进。

长期以来, ODA (O'Doherty-Anstey) 近似方法及其各种推广型一直是描述多次波影响薄层随机介质地震传输响应的主要方法。但是, 这种近似的前提是弱差异速度变化, 即假定速度平滑变化和反射系数小, 因此对裂缝介质不成立。一些学者在推导强差异随机介质 DOA 近似方面做了一些尝试。近年来, 为了处理超越非相互影响近似的散射效应, 在等价介质理论框架中出现了各种平均方案。考虑到裂缝、断层和连接点之间的多次散射, 学者们规划了 4 种方法: 表征法、传播算子矩阵法、虚波源法和叠加解析法。它们都有相当的精度。在这些方法中, 传播算子矩阵法似乎更为直接。

本届年会上, 俄罗斯圣彼得堡国立大学学者和 Shell 的研究人员着重研究了 Kennett (1985) 基于反射和透射矩阵附加规则的回归方案, 并据此分别推导出适用于弱差异和强差异层状介质中传输响应的 ODA 近似和强反射系数 (SR) 近似。这些公式适用于各种 (包括声学的、弹性的、黏弹性的等) 层状介质。借助于全局矩阵法, 他们从数值上检验了具有 4

层和 11 层强差异声学介质中 SR 近似的精度。结果表明, 在强差异声学介质中, SR 近似比较精确, 而传统 ODA 公式会导致较大的误差; 介质的层数越多, SR 近似就比 ODA 公式更优越。然而, 在强差异介质的低频段, 这两种近似的效果都不好。

这一推导结果在非常规和微地震环境下是有用的, 因为水压压裂储层中的裂缝就是强差异介质的典型例子。

孔隙介质中地震波的衰减一直是复杂介质地震理论研究的重点。研究表明, 在孔隙介质中, 中尺度非均质性 (大于孔隙和颗粒尺寸但小于波长) 是引起地震波衰减的主要原因。Delft 科技大学的学者用半球状包裹体表示中尺度非均匀性, 研究波在孔隙介质中的传播机理。为了捕获波在非均匀介质中的衰减效应, 他们提出一种获取 Biot 理论中有效参数的方法。这些有效参数表征了一种等价均质孔隙介质。他们将用 White 模型获得的结果与用周期性层状介质获得的结果进行了比较。结果表明, 半球包裹体模型比 White 模型具有更广的适用性。除了中尺度衰减机制外, 它还考虑了全局流动衰减机制。该模型可用作三维空间中复杂问题的模板, 用来预测含包裹体孔隙介质中的地震衰减。

地震波通常会引起次波长尺度的压力梯度, 产生所谓的中尺度流动。人们认为在特定情况下这种流体流动是主要的地震衰减机理。有效介质方法被广泛用于模拟非均匀系统中的中尺度流动效应。这样做不仅节约计算时间, 而且利用有效模量有利于观察和分析波传播对某些参数变化的敏感性。

White 等的不调和饱和模型提出了一种适用于周期性层状介质和半球包裹体周期性分布介质的有效 P 波模量的低频近似。这两种情况都强调了由于流体成分非均匀性引起的波衰减的重要性。因此, 其模型及其变量被广泛用于相关的研究。实际上, 这类模型描述的只是有效单相介质: 它们不能确切地解释慢 P 波的存在和流体质点位移。此外, 它们也未考虑 Biot 全局性流动衰减机理。在许多实际情况下, 这种机理在地震波有效频段内是可以忽略的, 但正像 Kndarova 等 (2013) 指出的那样, 对于高渗透性介质 (如具有弱骨架的砂岩沉积物), 这种机理对地震波衰减的贡献是不可忽略的。因此, Delft 科技大学的研究者们提出了一个用于球状包裹体周期性分布情况下的孔隙性弹性模型, 以探索 Biot 衰减机理和由非均匀性引起的衰减。

研究者对带有球形包裹体的孔隙介质中地震波传播的 White 模型进行了推广。该模型除半尺度损失机理外, 包含了 Boit 全局性流动衰减机理。其实现方式是允许流体流入或流出有代表性的体积单元。他们对可用作 Boit 均匀介质方程输入的有效参数进行了半解析性求导, 证实了这种介质中的衰减类似于周期性层状介质中的衰减, 当全局性流动机理可忽略时, 该模型在地震频段与 White 模型吻合得很好。在高频段, 该模型的预计速度比 White 模型高。对于呈高渗透性和弱骨架特征的砂岩沉积, White 模型的预计衰减要小得多。这一结果对应于周期性层状介质的预测结果。

该模型能用作预测非均匀介质地震波衰减的参考理论框架, 前提是非均匀性尺度远小于波长。该模型还可用作更复杂几何形态建模的样板方案, 以便在实验研究中拟合参数。研究认为, 该模型比 White 模型乃至其他使用非流动边界条件的类似模型具有更广泛的适用性。

五、数值算法及其应用

在地震勘探处理中, 叠前数据的零偏移距变换颇受关注。美国得克萨斯州大学的学者用

Gardner 延拓进行叠前地震数据变换, 为完成各种不同的数据分析任务 (包括时间偏移、数据重构和多次波衰减等) 提供了一种可逆的预处理工具。研究结果表明, 在常见的叠前时间偏移近似条件下, Gardner 延拓能消除地震反射时差速度对倾角的依赖性和反射时差对反射层曲率的非双曲依赖性。

反褶积是地震数据处理中常用的手段, 主要用于提高地震数据的分辨率。近年来, 反褶积方法也被用于指导地震反演和提高地震解释精度。本届年会上, 西安交通大学电子与信息学院的学者提出了一种基于负熵的地震频域盲反褶积算法。他们在算法中引入了标准对称能量分布 (SSPD), 不仅为地震反射描述提供了合适的手段, 而且简化了熵的计算。他们在算法中加入的约束项通过反褶积品质、噪声放大和多道记录的连续性之间的折衷改善了计算结果。合成和实际地震数据结果表明, 该方法能有效拓宽单个地震道的频带, 从而改善输出信噪比和多道连续性。图 5 反映了该方法用于改善地震分辨率的效果。

在用反褶积指导地震反演方面, 挪威理工大学的学者提出一种将褶积参数评估与储层岩性分类联系在一起的方法, 称为盲域反褶积 (Blind Categorical deconvolution)。他们指出, 地震数据表现为地下弹性介质特征差异的褶积反射, 其主要特性由岩性骨架和孔隙流体充填来确定。因此, 地震反演可看作地震数据与岩性—流体 (L—F) 域级的反褶积。有研究者将盲域反褶积模拟成自回归 Bernoulli-Gauss (BG) 过程, 必须用 MCMC (马尔可夫链蒙特卡罗算法) 的反复迭代来评估模型。而本文的研究者将褶积的隐马尔可夫 (HM) 模型推广到一个盲域反褶积环境, 用一系列回归算法定义一组近似解, 由此指导地震反演, 取得了令人鼓舞的结果。同时, 这种算法可实现解的精度与所需计算能力之间的折衷。

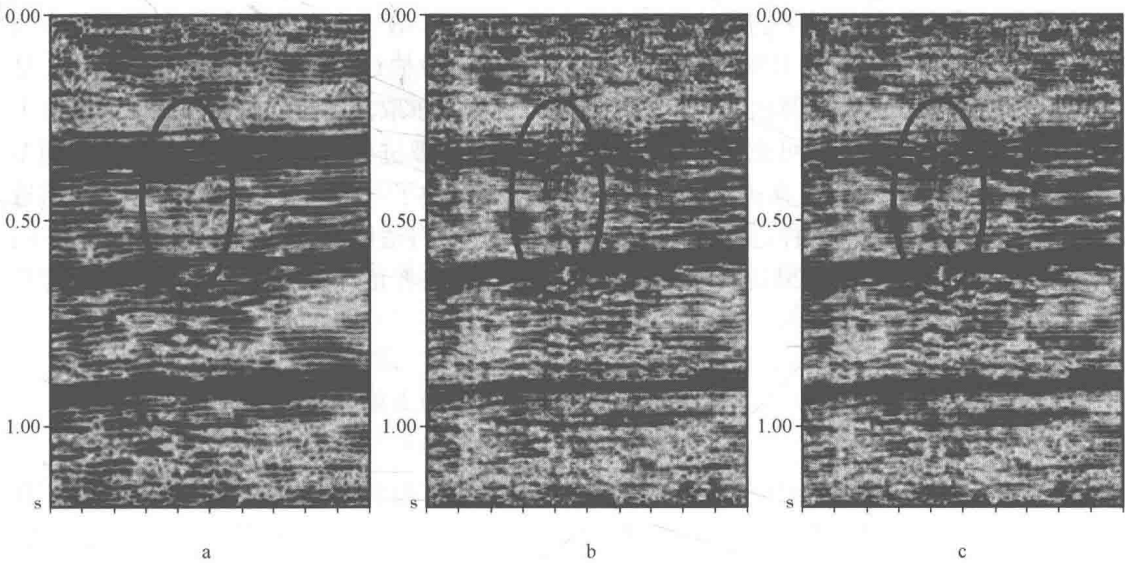


图 5 基于负熵的地震频域盲反褶积实例。

a—原始叠加剖面; b—未加二次正则化项的高分辨率结果; c—用新方法获得的高分辨率结果

在散射体反演方面, 同济大学的学者用散射波模拟研发了一种散射体反演算法。该方法首先将炮点道集分解成特征高斯包络, 并将所有高斯包络进行独立的逆传播, 然后将它们映射到模型域, 再反转成由 Gabor 函数描述的扰动模型。所有逆 Gabor 扰动的叠合生成最终的逆扰动模型。该模型可用于波动方程反射层析成像 (WERT), 这也是研究者研发该方法的初衷。图 6 给出了该方法的流程。图 7 为散射波激发时间示意图。

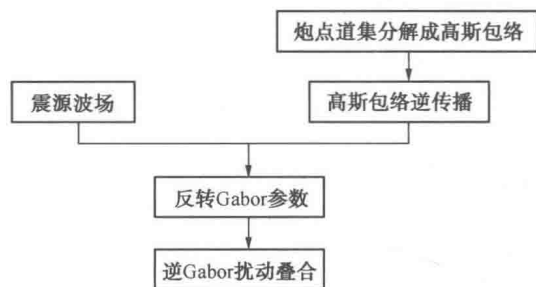


图6 带高斯包络的单炮道集散射反演流程

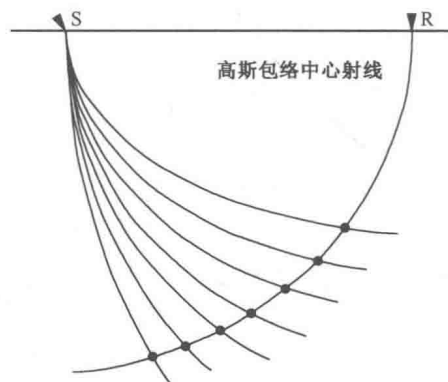


图7 散射波激发时间示意图

在地震反演中，如果不能模拟观察数据中所有的物理事件，那么使用反演方法就会产生矛盾方程组。这往往造成反演模型中出现严重失真。为解决这一问题，沙特阿拉伯阿普杜拉国王科技大学的学者提出了一种能部分忽略数据中因模拟局限性而无法解释的波至。他们引入失配函数以选择性地消除数据中某些不可解释的部分。如果对事件的预测接近 0，即使对应的观测部分是非零的，也认为这一部分是不可解释或不一致的。选择性消除是按照对应的预测梯度进行的，因为减小梯度部分等价于排除失配函数中预测误差的对应项。这种对梯度的指定作用是通过容忍非一致性数据（TID）的失配函数来完成的。非一致性数据例子测试表明，推荐的失配函数比常规 L2 失配优越。

在量化地震参数估计结果的不确定性方面，得克萨斯 A&M 大学的学者提出了一种多尺度 MCMC（马尔可夫链蒙特卡罗）算法。在地震传播参数估计的贝叶斯反演中，MCMC 是对后验分布进行采样的流行算法之一，它涉及制订方案并求取其可接受的概率。然而，对于大尺度问题，MCMC 的实现可能是非常昂贵的，因为它需要进行许多轮正演运算。而应用多级正演模拟的多尺度 MCMC 算法，为全部贝叶斯反演提供了一个真正的双重加速，即用近似后验算子通过预处理的采样过程加速和用多尺度方法的自适应特性进行的不同方案的正问题计算加速。初步的数值结果说明该方法是稳健的。研究者正计划将其推广到更复杂的反问题。

六、结束语

本届年会地震干涉方面的研究仍以提高地震成像精度为主，并向各种复杂介质（如弹性介质、多孔介质和裂缝介质等）的精确成像与定位问题拓展。超分辨率是一个新概念，近年来，人们在不断挖掘和利用数据中的信息（包括噪声）提高成像质量的同时，也在想方设法逾越传统的分辨率概念，提高成像精度。地震模拟研究仍然集中于通过正演模拟改进反演效果，以及用正演手段增强地震资料处理能力和提高处理结果的质量等方面。

在地震波速度分析、各向异性研究和被动源地震等领域，地震理论研究亦受到高度重视。地震速度分析仍然以偏移速度分析为主，用 FWI 指导偏移速度分析和各向异性建模是研究热点。各向异性研究则主要围绕裂缝介质进行偏移成像和参数反演。被动源地震理论研究成果涉及微地震事件的定位与成像等方面。

地震岩石物理技术

李 琼 陈兴华 曹 辉

成都理工大学

一、引言

地震岩石物理学是传统岩石物理学与地震勘探相结合的一种地球物理领域的新兴研究学科。斯坦福大学著名岩石物理学家 Mavko 对地震岩石物理学的定义是：运用岩石物理的方法将地震信号中的属性（如速度、波阻抗、衰减等）与岩石的特征性质参数（如密度、孔隙度、压力、孔隙流体、饱和度等）进行相关分析研究，使地震资料能与地质资料相辅相成，提高解释的准确性和一致性，降低地震资料解释潜在的风险。

近年来，岩石物理技术在油气勘探开发中发挥了重要作用，促进了时移地震油气监测、地震岩性识别、储层流体识别等油气监测技术的发展。本届 SEG 年会岩石物理专题包含 32 篇文章，主要包括岩石物理实验方法与技术、岩石物理理论与模拟研究、岩石物理学在地震勘探中的机制和应用实例。

二、岩石物理实验方法技术

1. 基于激光技术的超声波测试技术

在油气勘探开发中，泥岩的研究是油气藏储层研究的重要部分，最近成为被广泛研究的目标。随着研究的不断深入，需要新的实验方法去定量描述泥岩的岩石物理性质。为了测量岩石的弹性各向异性，Auckland 大学的 Ludmila Adam 等使用非接触式的激光超声系统（如图 1 所示）采集记录全波形数据，测量有机泥岩样品的纵波速度各向异性，获得提供岩石微观结构的具体信息。首次用激光测量了围压条件下 P 波的各向异性，并在 Waipawa 地层样品的弹性各向异性与岩石的显微观察结果之间建立联系。研究表明纵波的弹性各向异性能够使用层状泥岩中的有机物含量指示。

用这个激光系统测量了在围压条件下的 P 波的各向异性。泥岩样品都是来自新西兰东海岸盆地 Whangai 和 Waipawa 的地层的露头。第 4 个样品是从新西兰塔拉纳基盆地的 Turi 地层的钻孔岩心中获得。两个 Waipawa 地层的圆柱形样品，一个走向与层理平行（S5H 样品），一个走向与层理垂直（S5V 样品）。TAN 样品是从 3800m 深的 Turi 地层中获得的一个中心轴与层理平行的样品。

图 2 是 S2C 样品和 TAN 样品的激光超声数据，两个样品都表现出层状结构，然而，P 波各向异性只在 TAN 样品中观察到。黑色的点为通过换能器测量得到的样品的超声波测量结果，坏道是因为在记录过程中受到反射带下的空气泡影响。图 3 是来自 Waipawa 地层的相同岩石的激光超声波数据，它们的中心轴方向相垂直。由于 S5H 样品具有层状结构表现出

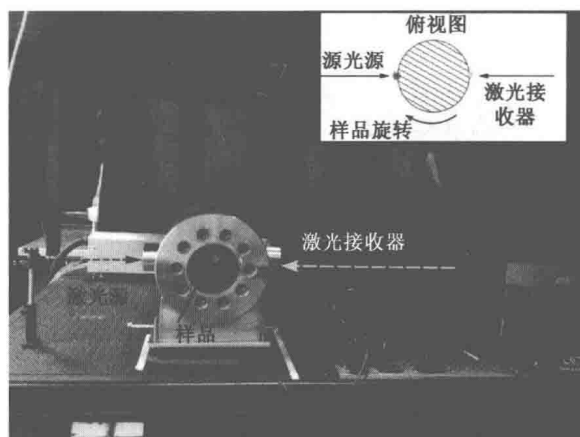


图1 实验装置图

明显的纵波各向异性，S5V 样品则没有表现出速度的各向异性。图 2 和图 3 展示了来自 Whangai, Waipawa 和 Turi 地层的岩心样品在 180° 旋转扫描的波形记录，黑圆点是用超声换能器测量得到的直接到达的 P 波时间。

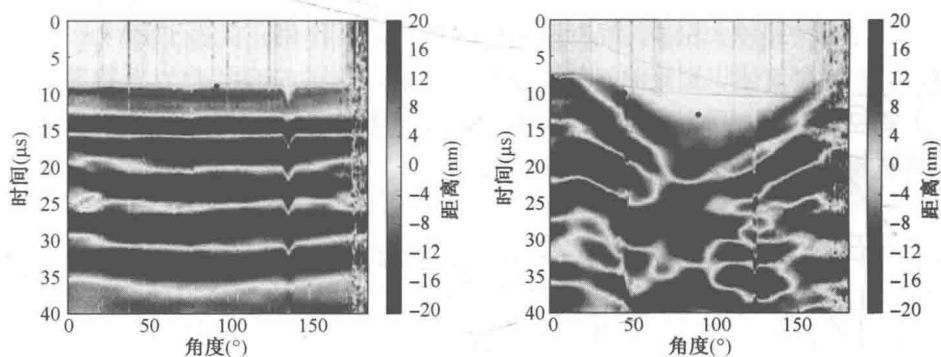


图2 S2C 样品和 TAN 样品的激光超声数据

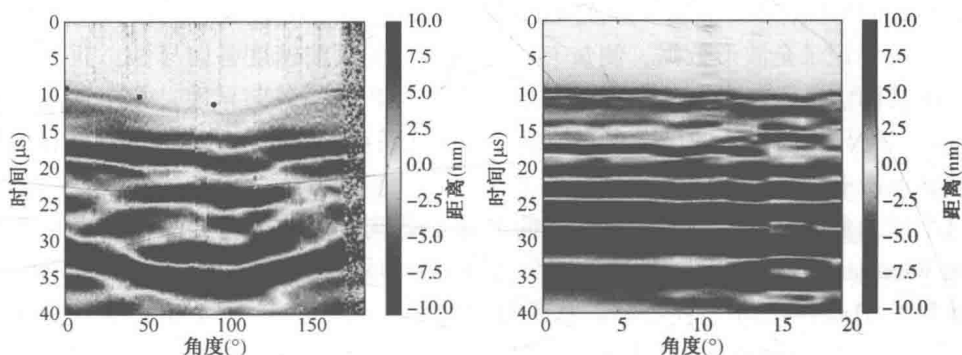


图3 来自 Waipawa 地层的相同岩石的激光超声波数据

对砂岩的各向异性研究也是油气勘探研究的一个热点，Curtin 大学的 Michael Carson 等通过激光干涉法对砂岩的超声横波的各向异性进行测量，也取得了较好的效果。其实验装置如图 4 所示，实验的几何相关示意如图 5 所示。

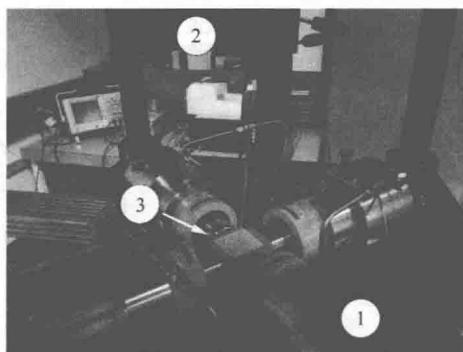


图4 砂岩样品在负载框架中置于两个螺线管中间。激光多普勒干涉法的传感器在图的上方
①为螺线管；②为激光多普勒干涉传感器；③为砂岩样品

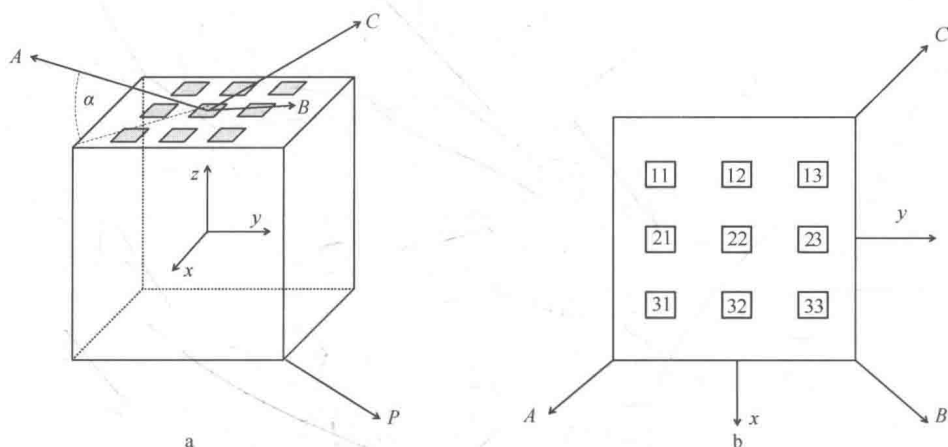


图5 实验的几何相关示意图

激光束入射方向 A 与测量点处的样品表面是 α 角度, A 、 B 、 C 三个轴相互垂直。 P 为样品下侧附着的横波换能器的极化方向

激光干涉法是一种非常有效的探测岩石中弹性波传播的方法。在 Bentheim 砂岩中, 观察到了横波双折射和偏振方向随应力的变化。

2. 地震波的非线性相互作用刻画孔隙结构及流体特征

麻省理工学院地球资源实验室的 Thomas Gallot 等提出了一种新的在实验室中利用地震波的非线性作用来刻画孔隙结构及流体特征的新技术。实验装置如图 6 所示, 通过顶部的换能器及左部的换能器发射弹性波到岩石样品中, 位于右部的接收探头接收信号, 并得到时间延迟。通过时间延迟, 我们就可以获得探头脉冲时间调制的单一测量值, 而时间调制又与应力 σ 有关。

$$dT = \frac{-dl}{2c} \frac{dM}{M} \quad (1)$$

$$\frac{dM}{M} = \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 \quad (2)$$

式中, T 为沿样品传播路径的旅行时; l 为路径长度; M 为弹性模量; c 为速度参数。利用该实验装置可以测得样品的应变 ε 。这样由上述公式就可以求得 β 和 δ 的大小, 作为描述岩石非线性的特征参数。当岩石含有裂缝时, 及其中包含流体时, 该装置测得的时间延迟不尽相同, 这样就可以进一步得到不同的非线性特征参数 β 和 δ 。故利用非线性特征参数 β 和 δ 就可以预测岩石的微裂缝结构及流体特征。

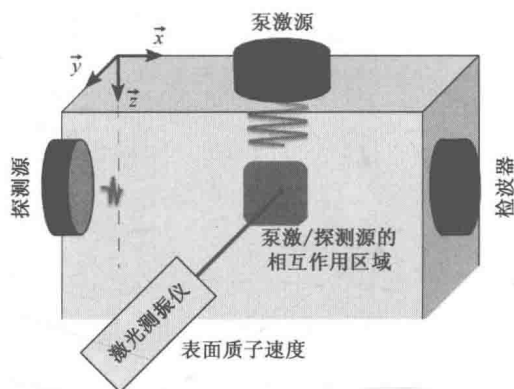


图6 实验装置图

3. 饱和流体实验

通常利用地震方法获得地下岩石的性质，弹性波的性质（如：速度和衰减）会随岩石和流体性质的变化而变化。弹性波的速度和衰减对于饱和状态及裂缝非常敏感，利用这种性质就可以定量预测裂缝及流体性质。英国南安普敦国家海洋学中心的 Kelvin Amalokwu 等基于理论模型，制作了一个定向排列的扁平形缝洞的人造砂岩模型，并在实验室超声条件下得到了部分饱和条件下定向排列裂缝对速度与衰减的影响情况。弹性波的速度和衰减对定向排列裂缝（各向异性）及部分饱气时的情况非常敏感，裂缝岩石却表现出与原来明显不同的特征，它与流体的饱和度有关。

他们用一种新的实验室超声测试系统测试了含有裂缝的岩石。这种岩石中包含两种定向排列裂缝（90°排列的裂缝与45°正常排列的裂缝），我们已经知道波在定向排列的裂缝中传播时， Q_s/Q_p 与 v_p/v_s 之间的关系会发生改变，这可以成为无裂缝岩石中饱和度的一个良好指标。平行于裂缝方向的横波分裂（SWS）能反映出裂缝密度和独立饱和度。这种新的实验室方法得到的数据表明，频率与饱和度有关，饱和度会影响弹性波的速度与衰减。故 Q_s/Q_p 与 v_p/v_s 之间的相互变化关系，可以看成是岩石中一种好的饱和度指示标志，如图7所示。

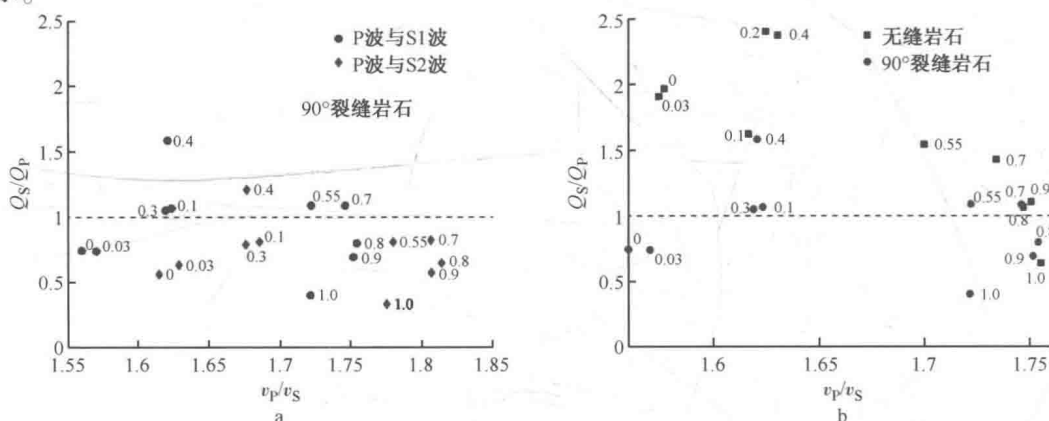


图7 a 为不同饱和度（饱和度大小为0~1之间）下裂缝岩石样品中的超声波 Q_s/Q_p 与 v_p/v_s 值的相对关系；b 为无缝隙岩石与有裂缝岩石样品中的 Q_s/Q_p 与 v_p/v_s 值。饱和度标注在相应数据点旁。下标 S1 表示裂缝岩石中产生的快横波，S2 为慢横波