

引用: 邹启伟, 董世泰, 吴立青, 等. 面向复杂介质的地震散射波采集技术[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(1): 156-165.
Zou Qiwei, Dong Shitai, Wu Liqing, et al. Scattered wave seismic acquisition technology for complex media[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(1): 156-165.

面向复杂介质的地震散射波采集技术

邹启伟¹ 董世泰² 吴立青³ 李东安³

(1 中国石油辽河油田公司; 2 中国石油勘探开发研究院; 3 北京世纪金道石油技术开发有限公司)

摘要: 地震勘探是一项以地震采集技术为基础的系统工程。变革地震采集技术既是采集装备升级、波场理论创新的发力点, 也是解决地震处理、解释技术问题的源头。地震勘探发展历程体现了采集装备能力提升、地质需求驱动、波场理论拉动的作用, 其中, 地震采集技术既充满活力, 也面临着深刻的挑战。面对小尺度、非层状、非均匀介质成像问题, 以及大数据与人工智能高速发展的时代背景, 以共中心点叠加为特征, 采用稀疏、规则、单一观测系统的反射波地震采集技术越来越显示出适应性, 为适应小尺度、非层状、隐蔽性目标成像要求, 以共中心点离散化为特征, 采用随机、遍历性、多观测系统的散射波地震采集技术势在必行。作为散射波地震采集技术的理论基础, 随机理论及概率波的研究逐渐得到重视。

关键词: 地震勘探; 散射波采集; 共中心点离散化; 概率波; 随机理论

中图分类号: P631.422 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.012

Scattered wave seismic acquisition technology for complex media

Zou Qiwei¹, Dong Shitai², Wu Liqing³, Li Dongan³

(1 PetroChina Liaohe Oilfield Company; 2 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 3 Beijing Century Kingdo Petroleum Technology Development Co., Ltd.)

Abstract: Seismic exploration is a system engineering based on seismic acquisition technology. The transformation of seismic acquisition technology is not only the starting point of equipment upgrading and theoretical innovation, but also the source for solving technical problems in seismic processing and interpretation. The development history of seismic exploration reflects the driving role of equipment capacity improvement, geological study demand, and progress of wave field theory. Among them, seismic acquisition technology is full of vitality and faces great challenges. Given the rapid development of big data and artificial intelligence, the reflection wave seismic acquisition technology, characterized by CMP stack and using sparse, regular, and single observation system, is increasingly unadaptable for imaging of small-scale, non-layered and non-uniform media. Meanwhile, the application of scattered wave seismic acquisition technology characterized by CMP discretization and using stochastic, ergological, and multi-observation system is imperative, so as to meet the imaging requirements of small-scale, non-layered, and subtle targets. Similarly, as the theoretical basis of scattered wave seismic acquisition technology, the study on stochastic theory and probability wave theory is gradually emphasized.

Key words: seismic exploration, scattered wave acquisition, CMP discretization, probability wave, stochastic theory

0 引言

回顾历史, 地震采集技术随着物探装备的发展而

具有内在的发展动力, 受地质需求、地震成像问题的驱动, 也依赖地震波场理论的发展。

进一步推动地震采集技术的发展必然涉及若干核

第一作者简介: 邹启伟 (1968-), 男, 辽宁辽阳人, 本科, 2005年毕业于长江大学, 高级工程师, 现主要从事地震采集、处理理论和方法研究及管理工作。地址: 辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街100号, 邮政编码: 124010。E-mail: zouqw@petrochina.com.cn

通信作者简介: 李东安 (1963-), 男, 江苏兴化人, 本科, 1984年毕业于江汉石油学院, 高级工程师, 主要从事地震采集、处理、解释方法与应用研究。地址: 北京市朝阳区北四环中路6号A座26C, 邮政编码: 100029。E-mail: lidongan@kingdo.com.cn

收稿日期: 2023-08-03; 修改日期: 2023-12-11

心问题:地震采集参数设计是针对地下复杂界面模型还是针对地下复杂介质模型;地震波在复杂介质中的传播理论等。本文希望阐述的观点是,自20世纪70年代之后,弹性波动理论与反射波地震勘探占据绝对主导地位,确定性的地震成像成为主要攻关方向,随着绕射波、散射波在小尺度、非规则储层研究中的优势被挖掘,面对地下复杂的介质条件,需要与之相适应的地震波场理论为指导,并对地震采集技术进行根本性的变革。

1 地震勘探技术发展历程

1.1 基于物探装备的不断发展

根据地震采集设备的升级换代,可将地震勘探的发展划分为以下5个阶段^[1-2]:

第一阶段:20世纪30—40年代,最初采用机械式地震仪,以照相的方式获得地震记录,之后采用电动式地震仪和真空管放大器,记录道数不超过24道,资料不能回放,不能做多次叠加,动态范围小(约20dB),结果不便保存。

第二阶段:20世纪50—60年代,采用模拟地震仪记录地震信息,一般记录道数为48道,可以实现多次覆盖观测,动态范围为40~50dB,信噪比有较大提高。

第三阶段:20世纪70—80年代,逐步进入数字时代,地震勘探技术实现巨大飞跃,利用数字地震仪和瞬时浮点放大器记录的地震信息量大幅度提升,动态范围可达120dB。地震仪以96~240道接收为主。地震资料的信噪比和分辨率均进一步提高。

第四阶段:20世纪90年代—21世纪初,进入高效地震勘探时代,激发震源多样化,记录道数从千道发展到万道以上,地震采集向分布式、模块化、无缆化发展,实现大面积、高覆盖次数、高效率地震观测。

第五阶段:2010年至今,逐步进入节点地震仪时代,节点仪器将检波器、采集电路、存储单元、锂电池、实时定位、信号同步集成一体,使地震采集方式发生质的变化,理论上无记录道数限制,观测系统可随机布设,地震数据直接记录在节点内,可连续记录一个月以上。节点地震仪是地震勘探技术的又一次重大飞跃,必将是下一次地震勘探技术革命的元素之一^[3]。

1.2 基于地质需求的驱动

为适应不同阶段的地质需求,地震采集技术经历

了5个发展阶段:

第一阶段:1950年之前,开展单点与多点采集,一维人工解释,用于概查地下构造的起伏与局部圈闭形态。

第二阶段:20世纪50年代,实现二维多次覆盖模拟数据地震采集,用于详查有利含油气盆地构造格架,查明区域构造单元。

第三阶段:20世纪60—70年代,实现二维多次覆盖数字地震采集,用于查明区域构造单元和局部圈闭形态,识别构造隐蔽油气藏。

第四阶段:20世纪80年代—21世纪初,实现三维多次覆盖数字地震采集,也涌现出时移地震、多波地震、井中地震、微地震等多种地震勘探技术,用于查明复杂构造及隐蔽油气藏。

第五阶段:2010年至今,重点发展高密度、宽方位三维地震采集,不断完善时移地震、多波地震、井中地震、微地震技术,用于识别各向异性复杂岩性体,预测岩性和流体性质,精细油藏描述、监测油气藏动态、辅助油藏工程措施^[4-5]。

1.3 基于波场理论的发展

地震采集技术方案的发展与演化通常与地震波传播理论相关联,一般认为经历了两个阶段:

(1) 20世纪70年代之前,属于几何地震学阶段。基于层状地层结构和均匀介质假设,地震采集需要满足求取各层的反射波速度与传播旅行时间的要求,主要利用几何光学的方法推导出地震波旅行时间与反射或者折射界面位置的基本关系。

(2) 20世纪70年代之后,进入弹性波动理论主导的地震采集阶段。虽然地质模型仍然基于层状地层结构,但已经考虑了地下介质的复杂性和异质性,通过模拟复杂介质条件下地震波的传播,确定合适的震源和接收器布置方式^[6]。地震采集不仅要求取各层的反射波速度与界面的传播旅行时间,而且需要保留反射波的频率与振幅属性,以获得更全面的地层信息及确定性成像^[7-8]。

2 地震采集技术面临的挑战

反射波地震勘探主要针对地层界面之间较大尺度介质的岩性、物性及流体性质的差异,利用地震波反射提取界面位置以及界面之间岩石物理性质的变化信息。面对地层中小尺度介质的岩性、物性、流体变化,需要更全面了解地震波场,获得反射波之外其他传播态式的

地震波。据此,地震采集技术面临以下基础性挑战。

2.1 反射波地震采集的核心是共中心点叠加,对刻画小尺度介质并不适用

对于反射波地震采集,一般只讨论连续或与地震波波长相当的界面,来自反射界面的菲涅尔带同相叠加是反射波的主要成分。面对层间介质,例如小尺度缝洞体,地震波主要由散射波构成,即便共反射面元远小于菲涅尔带半径,基于共反射面元叠加原理处理散射波信息也存在问题,地震成像尺度也与实际尺度有巨大的差别。对于小尺度地质体,反射波成像存在

较强的放大效应。

图 1a 是中国西部某区三维地震成像与钻井轨迹的井震标定,该地震数据使用 $15\text{m} \times 15\text{m}$ 面元采集,满覆盖次数为 392 次,钻井过程中钻井液漏失段与测井解释揭示溶蚀缝洞直径约为 7m,考虑溶蚀缝洞周围的破碎带,溶蚀缝洞边长约为 15m。图 1b 中红点为钻遇溶蚀缝洞在共反射面元中的位置与大小,图 1c 为溶蚀缝洞的地震成像水平切片,地震成像的边长为 120~180m。实例表明,如果用成像放大系数(成像尺寸/真实尺寸)表示,溶蚀缝洞的边长放大大约 10 倍,其面积放大约 100 倍,体积放大约 1000 倍。

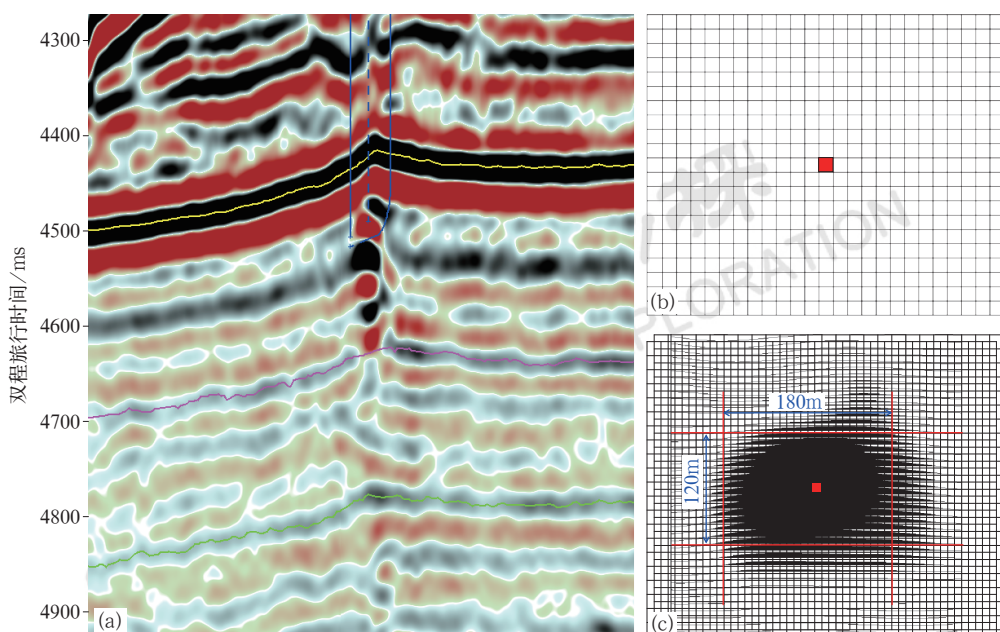


图 1 三维地震成像对钻井揭示溶蚀缝洞的标定

Fig.1 3D seismic imaging for the calibration of dissolution fractures and cavities penetrated by well drilling

(a) 实际地震成像剖面; (b) 三维地震面元网格; (c) 三维地震面元网格背景上的地震成像水平切片

2.2 稀疏、规则的观测系统无法采集完整的地震波场

实际地层结构由多尺度的界面与介质构成,不满足层状、连续介质假设。图 2 是一组用纵横向变差函数构建的随机地质模型,分别是针对层状连续介质、块状离散介质及高角度断裂破碎带。实际上,地下地质结构是上述 3 种模型的集合,地震勘探既需要探测界面的连续性变化,也需要探测地层的突变与终止,更需要探测多尺度介质的随机变化。

显然只有图 2a 表征的地质模型适合用常规观测系统采集地震数据,对于图 2b、c 表征的地层特征,继续采用稀疏、规则的采集方式无法得到完备的地震数据,即不能采集到适应这种地层结构成像

的地震波场。

2.3 确定性解难以完整诠释小尺度非均质体的地震波成像

地震采集的空间采样下限一般由弹性波横向分辨率确定,且由波动方程得出的确定性的地震成像无法超越地震波的分辨能力。面对小尺度非均质体,不能同时满足横向分辨率与最小介质尺度对空间采样两方面的要求。也就是说,地震波是有一定频带范围的弹性波,实际地质体却可以按照不同的尺度无限细分,需要分辨的介质尺度远小于弹性地震波的可分辨能力时,仅依靠确定性的解,即使提高地震波的空间采样密度也无法获得更高的成像精度。

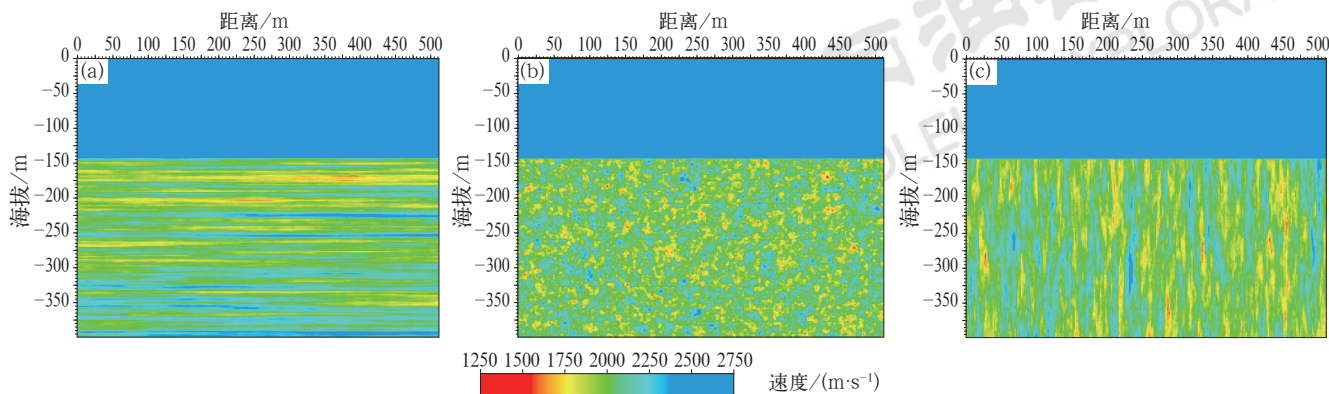


图 2 利用纵横向变差函数构建的随机地质模型

Fig.2 Stochastic geological model constructed by using y - and x - variation functions

(a) 层状连续介质; (b) 块状离散介质; (c) 高角度断裂破碎带

图 3a 为一个二维随机介质模型剖面, 内部镶嵌了边长为 10m 的稀疏散射体, 采用 80Hz 雷克子波, 用波动方程正演, 模拟野外地震采集数据, 图 3b 为

1m × 1m 面元采样的反射波成像, 图 3c 为 10m × 10m 面元采样的反射波成像。可以看到, 虽然提高了空间采样密度, 但地震成像之间并无明显差异。

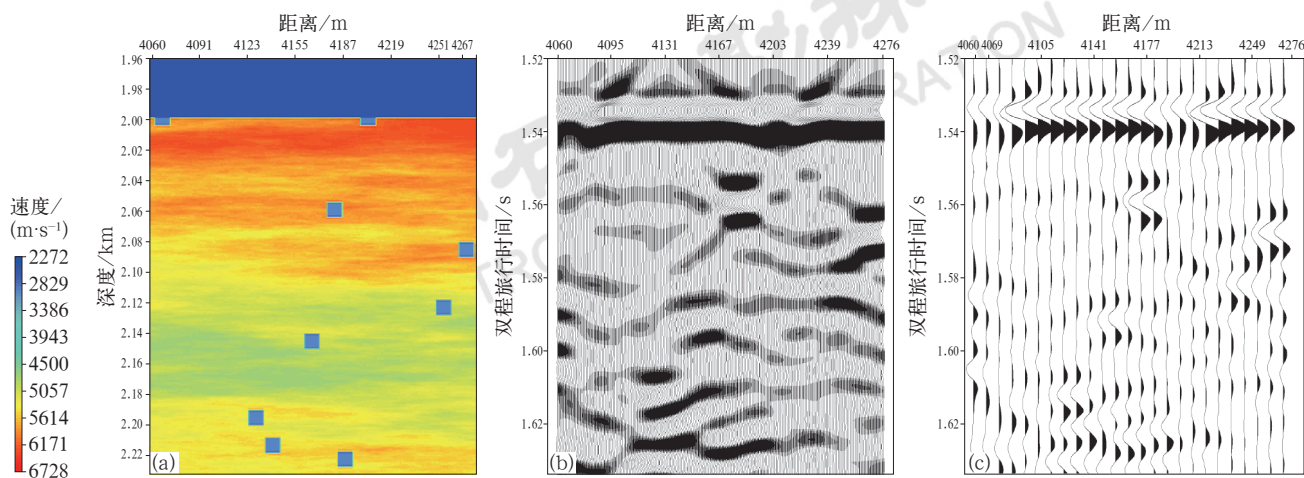


图 3 随机介质模型与叠前时间偏移成像

Fig.3 Random media model and pre stack time migration imaging

(a) 二维随机介质速度模型; (b) 小面元反射波成像; (c) 大面元反射波成像

3 复杂介质中地震波的传播

对于地下任意三维非均匀介质, 散射波可构成其地震波场最基本的态式^[9], 地面地震方法可以利用背向散射研究复杂介质中地震波场变化。目前对于散射波的研究包含了弹性波动理论与概率波理论。

3.1 基于弹性波动理论的散射波传播

1960 年 Chernov^[10] 应用随机介质中标量波传播开创了地震波散射理论的先河; 1969 年 Aki 提出尾波是岩石层非均匀性引起的背向散射; 2014 年吴如

山等^[11] 研究了弹性波在非均匀介质及小尺度非均质体中的散射特征; 2005—2016 年间, 尹军杰等总结了国际上研究散射波的成果^[12-14], 系统阐述了地震波散射的各种形态及适用范围。此后, 在弹性波范畴利用地震波场信息进一步研究地球内部介质非均匀性的工作大致分为两类, 即确定性方法和随机性方法^[15]。

3.1.1 确定性理论及其研究方法

确定性研究主要是将复杂介质的背向散射作为界面反射的微扰项, 借助各种解析方法实现地震成像, 从借用声波方程到标量波动方程再到矢量波动方程, 通过反演地表观测到的波场得出地下介质的三维波阻抗分布^[16-17]。

(1) 通常使用微扰理论研究地震波场的弱散射问题,在某种激发、接收系统中用公式(1)表达,将介质的慢度 $s(x)$ 分解为背景慢度 s_0 和扰动慢度 $\delta s(x)$ 两部分:

$$s(x)=s_0+\delta s(x) \quad (1)$$

式中 x ——场点位置。

全波场 P 由背景波场 P_0 与散射波场 P_1 叠加构成,公式(2)为散射波场的非线性方程:

$$P_1(x,t)=P(x,t)-P_0(x,t) \quad (2)$$

式中 t ——双程旅行时间, s 。

如果散射波场相对于背景波场而言比较弱,可用背景波场的格林函数 $G_0(x|x_s)$ 近似全波场的格林函数 $G(x|x_s)$,公式(3)称为 Born 近似:

$$G(x'|x_s) \approx G_0(x'|x_s) \quad (3)$$

式中 x_s ——源点;

x' ——测量点。

通过求解 Helmholtz 方程,可以给出 Born 近似条件下用格林函数表达的散射波场的线性方程式(4),并已应用在地震勘探领域^[18]:

$$P_1 \approx \omega^2 \int W(\omega) m(x') G_0(x'|x_s) G_0(x|x') dx' \quad (4)$$

式中 ω ——频率, Hz;

$m(x)$ ——介质性质扰动方程;

$W(\omega)$ ——频率方程。

(2) 散射波在更为广义的非均匀地球介质中传播,需要考虑介质的强散射效应。在散射体的体积比达到 40% 时,需要考虑多次散射效应。前人处理多次散射问题主要依靠解析理论与传输理论,解析理论考虑的主要变量是波函数,从基本微分方程出发,考虑了所有散射与干涉效应。

传输理论则直接处理非均匀介质中的能量传递,其考虑的变量是能量、密度与能流,考虑能量的叠加而不是场的叠加^[15]。2002 年,李小凡^[19]推出了大延伸非均匀连续介质的弹性波能量传输方程,对强散射的研究主要在天然地震领域,在地震勘探领域则鲜有应用。

3.1.2 随机理论与介质的统计特征

研究发现,地震波散射牵涉到大量小尺度非均质体时,确定性的研究非常困难,或者根本不可能^[11]。进而提出了基于随机理论的方法,研究复杂介质的统

计特征。

当散射波传播距离远大于非均质体尺度时,希望反演它们的统计特性或用若干统计参数表征,如平均尺度、功率谱、介质参数变化的均方根等。如果数据足够多,还可以求出这些统计参数随空间的变化。散射波场的统计特性包括空间相关、频率相关、角度相关,或它们的联合相关函数,建立波场统计特征与非均质体统计特征之间的关系,就可根据观测数据的统计特征来反推地下非均质体的统计特征^[15]。

(1) 弱散射理论情况下,可以根据 Born 或 Rytov 近似得到散射场的公式,然后再用集平均 (ensemble average) 方法求波长相关函数,可得到波长相关函数与介质统计参数的关系。

(2) 强散射理论条件下,曾推导出 2 阶和 4 阶统计矩阵方程,但地震波研究中应用较少,应用较多的是辐射传输 (radiation transfer) 或能量传输 (energy transfer) 理论,在这时波长的相位及干涉效应均被忽略,只考虑在多次散射时的能量传输关系。

总而言之,在弹性波动理论条件下,利用随机理论研究非均匀介质的统计特征,反映了地震波场可能的状态或演化方式,按某种权重进行统计,可以得到关于地震散射波状态的概率分布。

3.2 基于概率波理论的散射波传播

2013 年,法国学者 Landa^[20] 提出量子地震成像的可能性问题,近期不断有学者在研究基于量子力学的信号与成像表达^[21-22],但将量子力学的基本概念推广到地震波在非均匀、多尺度的地球介质中传播与测量,实现基于量子力学的地震勘探,还有许多理论问题需要解决。

首先,在复杂介质中以何种方式采集地震数据是描述地震波场的关键,李东安等^[23]提出了用近似空间连续采样获取散射信息。解决从经典力学的机械波 (包含弹性波) 向量子力学的概率波 (也称物质波) 转化问题,其核心在于区分经典波叠加与量子态叠加^[24]。

其次,针对地震勘探对象及过程,研究地震波散射的波粒二象性,是用概率波的理论研究复杂介质地震波散射的主要契机,这时地震波函数用复函数表达,它最终描述了散射波所承载的介质的本征特性。广义而言,就是构建量子系统及概率波态叠加概念^[25]。

3.2.1 量子系统与量子态

借用量子力学的概念,散射波在复杂介质中传

播,描述了一个具有离散性和波动相干性,由波函数 $|\psi(r,t)\rangle$ 描述的物质状态,其中 ψ 为波函数, r 为场点到源点的距离,单位为 m,其矢量形式为 $\psi(\vec{r},t)$ 。认为散射波传播与复杂介质构成量子系统,同样,这种由地震波激发、接收过程描述的一个孤立系统的状态又称为量子态。因此,通过 N 次激发,只要知道地震信号采集过程包含了系统所有的信息,就能预测对系统进行测量的结果。而且,波函数的模的平方 (即 $|\psi(\vec{r},t)|^2$) 表示粒子在空间某点单位体积内出现的概率。

具体而言,就是将三维地震探测空间分解为空间离散的介质点,所有这些点在不同的时间受震源作用构成一组基矢空间,然后用介质本征态在一个势场中出现的概率关联目标信号,其主要目的是产生一组介质固有频率波函数的基矢。如果把目标图像看作是一个量子系统的势场 $V(y)$,用一个能量为 E 的地震源探测这个介质空间,则介质本征态在某个位置出现的概率由波函数 $\psi(\vec{r},t)$ 决定。这样一个系统可以用动态薛定谔方程描述。

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi = -V(y)\psi + E\psi \quad (5)$$

其中, m 是量子粒子的质量,单位为 kg; \hbar 是 Planck 常数, ∇^2 是 Laplacian 算子。公式 (5) 的解是能量 E 和对应的波函数。这组基的主要特征有两点:

- (1) 介质固有频率随着一个对应于能量的参数增加;
- (2) 对应于一组给定的基函数,信号强度低时,介质固有频率高。为了简化讨论,考虑一维的情况。假设 V 是常数,在周期性的边界条件下,上述方程的本征解 [公式 (6)],即本征波函数为

$$\psi(y) = Ae^{\frac{i\sqrt{2m(E-V)}}{\hbar}y} \quad (6)$$

其中, A 是振幅; i 为虚数单位; 每个波函数 ψ 对应一个特定的 E 值。当 E 取分立的 N 个不同的数值时,可以得到 N 个不同的波函数。这些波函数构成一个量子化的基矢空间。振荡频率依赖于 $E-V$,但具体的值可由 $\hbar^2/2m$ 精细调控。

3.2.2 概率波的态叠加与费曼路径积分

由于两个或两个以上的波函数态叠加构成一个新的量子态,因此态叠加之后,只有概率性的解,叠加前的各个量子态将保持相对独立性。散射波利用经典波叠加构成弹性波,散射波利用量子态叠加构成

概率波 [公式 (7)],可以说,弹性波是概率波的降维表达。

$$\psi(\vec{r},t) = C_1\psi_1(\vec{r},t) + \dots + C_n\psi_n(\vec{r},t) \quad (7)$$

其中, C_i 为常数; n 为叠加波函数的数量。此外,费曼路径积分^[20]是一种用于计算粒子运动和相互作用的方法。费曼路径积分考虑了粒子在所有可能路径上的贡献 [公式 (8)],并且路径的权重是由概率幅决定,它允许在量子体系中进行概率预测,而不是像经典物理学那样进行确定性计算。

$$S[q(t)] = \int L(q(t), \dot{q}(t), t) \quad (8)$$

其中, S 为粒子在旅行时间内动能和势能差的积分; $q(t)$ 是系统在双程旅行时间 t 的广义坐标; $\dot{q}(t)$ 是广义坐标 $q(t)$ 关于双程旅行时间 t 的导数 (即广义速度); $L(q(t), \dot{q}(t), t)$ 是拉格朗日量,描述了系统的动力学性质。

分析表明,复杂介质中地震散射波的采集与处理更需要概率性研究。因此,散射波采集可以用更高的密度甚至空间连续采样,通过计算无限细分网格点的概率幅,散射波成像可以突破地震波频率的限制。

4 复杂介质中地震波的观测

在复杂介质地震波传播理论指导下,考虑到介质尺度与空间采样定律的关系,而且弹性波与概率波均需要随机理论与介质统计特征,选择循序渐进与物理可实现的地震波观测方式同样十分重要。

4.1 按照弹性波观测散射波

散射波地震勘探尚未应用到石油勘探开发领域,因此,目前还没有真正意义上针对石油地质目标的散射波地震采集实践。

对复杂介质中地震波的观测研究主要源于金属矿床探测及工程地震应用。尹军杰^[26]通过散射成像数值模拟提出采集参数论证;勾丽敏^[27]针对金属矿床的特点,论证了散射波地震勘探方法与特征;赵晓鹏等^[28]论述了在工程勘探中地震散射技术在探测海底隧道孤石中的应用。

笔者在最近的研究中探讨了散射波地震采集在石油领域应用的可行性,认为应采用“小面元、小道距、小偏移距及高覆盖”采集地震波散射信息,并通过与反射波地震数据融合,实现散射波成像。

4.2 按照概率波观测散射波

目前还不能完全清楚散射波量子测量的所有特征,基于概率波的理论,首先,可以对地质目标长期连续观测,在同一位置多次激发和接收,利用更充分的采样获得更可靠的概率;其次,如果对地质目标空间连续观测,就可以用无限细分的概率幅描述无限细分介质的物理性质,而且不再受地震波频率的限制。

此外,对概率波的观测可以利用量子测量假设,在散射波与复杂介质构成的量子系统中,地震采集与处理均被认为是测量过程,当对复杂介质进行散射波测量时,测量结果为散射算符本征值当中的某一个,而且,测量结果为 $|k\rangle$ 的概率为 $|\langle k|\psi\rangle|^2$ 的平方($|k\rangle$ 代表用狄拉克符号表述的波矢)。

5 散射波地震采集实现方法

无论基于弹性波动理论还是概率波理论,均希望通过地震采集获得完备的地震波场信息。早年主要

是装备受限,无法实现多观测系统采集,更无法设想空间连续采样的实现方式。经过长期发展,目前具备针对局部目标实现遍历性采集的条件,而且具有以下特征。

5.1 以地质目标为导向的采集设计

散射波地震采集面向局部地质目标,以探测复杂介质的岩石物理属性为主要目的,需要基于遍历性和局域性规则设计观测系统,即便装备条件满足,散射波地震采集也必须以目标为导向(图4),针对性设计采集方案。

重要的甜点评价区,可采用共中心点离散化采集方案;对重要的油田开发区,可采用补丁式地震采集方案;对于重要丛式井开发井场或CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage)矿场,由于接收装置不需要搬迁,又有定期监控需求,可采用时移地震激发与空间随机激发相结合的方式设计采集方案。

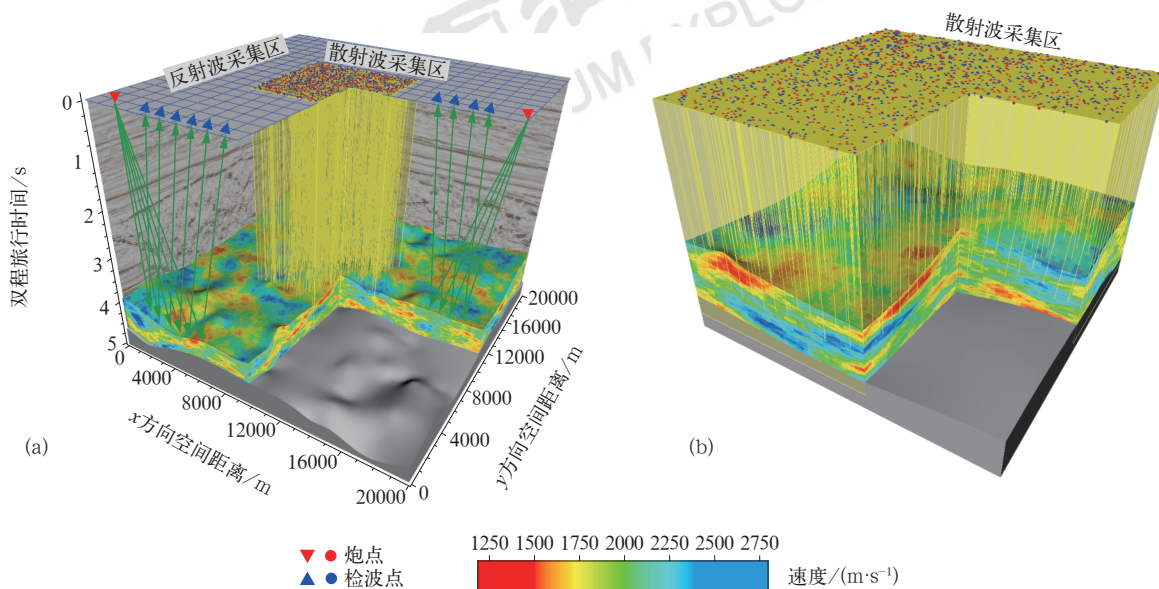


图4 以地质目标为导向的散射波地震采集

Fig.4 Scattered wave seismic acquisition guided by geological targets

(a) 镶嵌在反射波采集内的散射波采集; (b) 散射波采集

5.2 CMP道集离散化与炮道密度控制

对于连续的地下界面可以通过稀疏、规则的地震观测恢复其形态特征,对于离散的多尺度介质只有通过空间连续及遍历性的观测才具备恢复其物理特征的条件。实现对地下介质的空间连续观测,野外施工作业有两条途径。

(1) 考虑目前线束状地震采集习惯,最为有效的方式是主动实现炮点与检波点在有限范围内随机布设。模型试算表明,取道间距及炮点距的一半作为检波点与炮点随机半径可以达到较为均匀的共中心点道集离散化的目的(图5)。该设计实现了多面元条件下的覆盖次数均匀分布。

(2) 可以通过无桩号采集方式实现炮道密度控制的

激发与接收。从地质需求考虑,复杂介质的尺度越小,单位面积面元数就越高;地质条件越差,散射波的信噪比越低,覆盖次数就越高。两者相乘确定炮道密度。

$$\text{炮道密度} = \text{单位面积面元数} \times \text{覆盖次数} \quad (9)$$

从采集能力考虑,首先确定接收总道数,然后确定炮道密度,进而确定激发总炮数。接收总道数越

多,激发总炮数相对减少;接收总道数减少,激发总炮数就增多。

$$\text{激发总炮数} = \text{接收总道数} / \text{炮道密度} \quad (10)$$

据此,可以通过散射波采集设计软件实时监控单位面积内的激发装置与接收装置的位置和数量,实现遍历性地震采集。

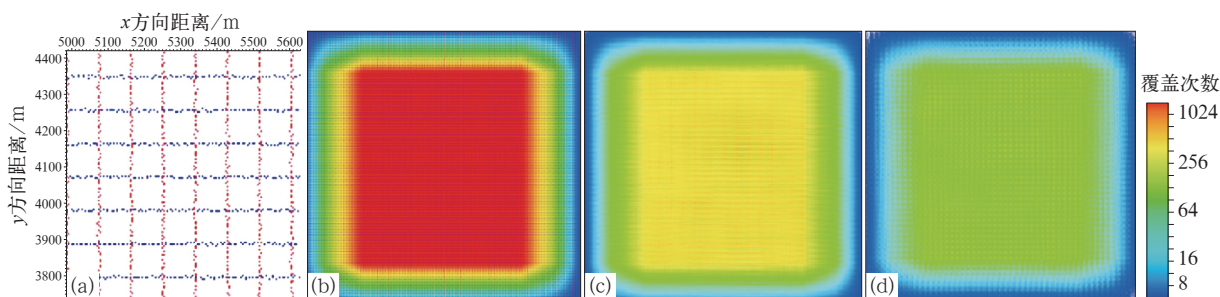


图5 炮点、检波点布设和覆盖次数分布图

Fig.5 Layout of shot points and detection point and fold distribution

(a) 炮检点半个道距随机布设图形; (b) 10m × 10m 面元覆盖次数分布; (c) 5m × 5m 面元覆盖次数分布; (d) 2.5m × 2.5m 面元覆盖次数分布

5.3 采用“三小一高”采集参数

基于对复杂介质条件下散射波传播特征分析,对于非均匀非连续介质需要采用连续、遍历性的观测方式。在现阶段,采集参数需满足小面元、小排列、小道距、近偏移距高覆盖条件^[29],关键是采用近偏移距高覆盖方式。

5.4 利用连续地震采集补充散射波信息

根据弹性波动理论,空间重复采样是无效的,但概率波理论使重复激发、接收变得有意义。在需要精细描述与长期监测的地区,通过不移动或少移动激发、接收装置,实现连续地震采集,既实现了超高密度,地震采集效率也比较高,以数据量为单位的采集费用可以大幅度削减,采集成本得到有效控制。

5.5 利用压缩感知技术节约设备与降低消耗

共中心点离散化与空间连续采样技术让炮检点随机布设成为必需,同时,由复杂介质产生的背向散射能量弱,超高炮道密度采集也成为必然。利用压缩感知技术可以有效控制地震采集成本,在随机采集与接收过程中,大幅度减少激发次数与接收道数(大于20%),并在后期的数据处理过程中完整恢复采集设计设定的炮道密度。

6 散射波地震勘探配套技术

6.1 利用多态式叠加提高勘探精度

对于连续界面,通过空间离散采样可以恢复界面的形态,对于离散介质,通过空间连续采样可以恢复介质的岩石物理属性。从全波场地震勘探的立场看,充分利用多态式数据叠加的优势,从3个方面提高地震勘探精度:(1)反射波地震采集与散射波地震采集叠加;(2)弹性波成像与概率波成像叠加;(3)确定性解释与概率性解释叠加。

6.2 使用多观测系统实现完备采集

由于地下勘探目标有不同的尺度、地震波存在不同的传播态式,需要不同的采集参数对应,采用统一的观测系统既不经济也不现实。具体包括一次采集的多观测系统设计,也包括多次采集使用不同观测系统。

在完备的散射波处理流程与技术尚未建立之前,可以继续利用弹性波动理论解决散射波成像问题,或者说是多态式地震波的成像问题。

6.3 开展多态式地震信号分析

事实上,在基于反射波理论分析原始数据时,许

多散射信息作为随机噪声被压制,近道高频信号经常被切除。在散射波地震采集方式下,单炮记录包含了丰富的信息,尤其是注重了绕射、散射等弱信号的采集。信号与噪声需要重新认识,通过多域叠前数据重排,有效地剔除规则噪声,如浅层折射波、面波、有源干扰等,而在常规处理中被定义的随机干扰、次生干扰是绕射波、散射波的特征,应予以充分重视与保留。

6.4 实现数据融合与弱信号增强处理

面对多观测系统采集的数据及 CMP 道集离散化后面元细分数据,需要提供融合处理方案与弱信号增强处理方案。这也是后续波场分离及波场分离之后各种成像方法的数据基础。

对于不同期采集、同期多观测系统采集的超高道密度数据,数据融合处理的目的是从时间、空间、属性三方面达到信息互补;弱信号增强处理涉及多态式地震波物理性质的差异,目的是均衡利用反射波、绕射波与散射波信号。主要包括以下技术。

面元细化技术:通过基本面元离散共中心点道集、实现多观测系统融合。

微测井约束静校正技术:解决多观测系统静校正问题。

一致性匹配技术:解决时间、能量、频带、相位、激发方式与子波等差异。

数据规则化技术:对面元内不规则的道集数量与能量采用 5A 插值、压缩感知等技术。

融合数据的速度建模技术:数据融合后的速度场建立。

7 展望与讨论

地震采集技术是充满创新力的地震勘探技术发展的火车头,它承载了装备发展的动能,也拉动了后续处理解释技术的进步,但目前受制于反射地震波场理论和技术的制约。

面对复杂探区的精细勘探与高效开发,从采集方式、成像技术到解释应用,全方位审视反射波地震勘探技术的规则与限制。散射波地震勘探是面向更复杂地质对象的必然选择,也是装备与技术达到一定水平后的必然选择。

散射波地震采集是新一代采集技术革命的开端,既然复杂探区含油气目标横向尺度小,非均质性强,需要预测储集体的物性与含流体性质,已不是常规的针对界面稀疏测量与针对传播路径的精确计算可

以完成,就需要探索基于量子物理不确定性解的方式与方法。

本文提出的散射波地震采集可能是比较容易接受的概念,而基于概率波理论的散射波传播与成像则属于抛砖引玉,仍需进一步拓展完善,只有这样才能在未来实现空间域、时间域连续的地震采集与基于概率幅的地震成像,开启量子地震勘探的新时代。

参考文献

- [1] R.E. 谢里夫, L.P. 吉尔达特. 勘探地震学[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
Sherif R E, Geldart L P. Exploration seismology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [2] 林腾飞, 窦立荣, 甘利灯. 地震勘探技术发展历程及展望[J]. 世界石油工业, 2023,30(1):57-69.
Lin Tengfei, Dou Lirong, Gan Lideng. Development history and prospect of seismic exploration technology[J]. World Petroleum Industry, 2023,30(1):57-69.
- [3] 杨勤勇, 杨江峰, 王成彬, 等. 中国石化物探技术新进展及发展方向思考[J]. 中国石油勘探, 2021,26(1):121-130.
Yang Qinyong, Yang Jiangfeng, Wang Xianbin, et al. Progress and development direction of geophysical prospecting technology of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(1):121-130.
- [4] 郭旭升, 刘金连, 杨江峰, 等. 中国石化地球物理勘探实践与展望[J]. 石油物探, 2022,61(1):1-14.
Guo Xusheng, Liu Jinlian, Yang Jiangfeng, et al. Geophysical exploration practices and perspectives at Sinopec[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022,61(1):1-14.
- [5] 易维启, 董世泰, 曾忠, 等. 中国石油“十二五”物探技术研发应用进展及启示[J]. 石油科技论坛, 2016,35(5):33-43.
Yi Weiqi, Dong Shitai, Zeng Zhong, et al. Geophysical technologies developed and applied by PetroChina during the 12th Five-Year Plan[J]. Oil Forum, 2016,35(5):33-43.
- [6] 谢小碧, 何永清, 李培明. 地震照明分析及其在地震采集设计中的应用[J]. 地球物理学报, 2013,56(5):1568-1581.
Xie Xiaobi, He Yongqing, Li Peiming. Seismic illumination analysis and its application in seismic survey design[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(5):1568-1581.
- [7] 安艺敬一, P.G. 理查兹. 定量地震学[M]. 北京:地震出版社, 1986.
Aki K, Richard P G. Quantitative seismology theory and methods [M]. Beijing: Seismic Press, 1986.
- [8] 刘喜武, 刘洪. 地球物理勘探技术所面临的挑战及可能的数学解决方案[J]. 中国海上油气(地质), 2003,17(2):145-148.
Liu Xiwu, Liu Hong. Challenges to geophysical prospecting techniques and possible mathematical solutions[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2003,17(2):145-148.
- [9] 吴如山, 安艺敬一. 地震波的散射与衰减[M]. 李裕澈, 卢寿德, 等, 译. 北京:地震出版社, 1993.
Wu Rushan, Aki K. Scattering and attenuation of seismic waves[M]. Li Yuche, Lu Shoude, et al, translated. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [10] Chernov L A. Wave propagation in radom medium[M]. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [11] 吴如山, 谢小碧. 地震学百科知识(十二):地震波散射[J]. 国际地

- 震动态, 2014(6):31–36.
- Wu Rushan, Xie Xiaobi. Encyclopedia knowledge of Seismology (12): scattering of seismic waves[J]. Recent Development in World Seismology, 2014(6):31–36.
- [12] 尹军杰, 刘学伟, 李文慧. 地震波散射理论及应用研究综述[J]. 地球物理学进展, 2005,20(1):123–134.
- Yin Junjie, Liu Xuewei, Li Wenhui, *et al.* The view of seismic wave scattering theory and its application[J]. Process in Geophysics, 2005,20(1):123–134.
- [13] 贾豫葛, 李小凡, 张美根, 等. 地震波散射研究的若干重要进展[J]. 地球物理学进展, 2005,20(4):939–944.
- Jia Yuge, Li Xiaofan, Zhang Meigen, *et al.* Some important progress in research upon seismic wave scattering [J]. Process in Geophysics, 2005,20(4):939–944.
- [14] 邵婕, 唐杰, 孙成禹, 等. 地震波散射理论及其应用进展[J]. 地球物理学进展, 2016,31(1):334–342.
- Shao Jie, Tang Jie, Sun Chengyu, *et al.* Progress of seismic wave scattering theory and application[J]. Process in Geophysics, 2016,31(1):334–342.
- [15] 李信富, 李小凡, 李米田. 地震波散射研究回顾与展望[J]. 物探化探计算技术, 2007,29(4):286–294.
- Li Xinfu, Li Xiaofan, Li Mitian. Review and prospect of seismic wave scattering research[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007,29(4):286–294.
- [16] 李灿苹, 刘学伟, 王祥春, 等. 地震波的散射理论和散射特征及其应用[J]. 勘探地球物理学进展, 2005,28(2):81–89.
- Li Canping, Liu Xuewei, Wang Xiangchun, *et al.* Seismic wave scattering theory, scattering characteristics and its applications[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005,28(2):81–89.
- [17] 沈鸿雁. 地震散射波成像技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- Shen Hongyan. Study on seismic scattering wave imagination[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [18] 黄建平. 基于多次散射理论的地震散射波成像技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- Huang Jianping. Research on seismic scattered wave imaging technology based on multiple scattering[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2019.
- [19] 李小凡. 大延伸非均匀介质中地震波全弹性散射理论 I: 弹性波单次散射理论[J]. 力学学报, 2002,34(4):559–568.
- Li Xiaofan. Theory of full elastic scattering of seismic waves for heterogeneous media of large extent I: theory of elastic waves of single scattering[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002,34(4):559–568.
- [20] Landa E. Quantum seismic imaging: is it possible?[J]. Journal of Seismic Exploration, 2013,22:295–310.
- [21] Dutta S, Basarab A, Georgeot B, *et al.* Quantum mechanics-based signal and image representation: application to denoising [J]. IEEE Open Journal of Signal Processing, 2021,2:190–206.
- [22] Xue Yajuan, Wang Xingjian, Cao Junxing, *et al.* Estimation of seismic quality factor via quantum mechanics-based signal representation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 2022,60:4513011.
- [23] 李东安, 漆立新. 全波场地震勘探技术[J]. 石油勘探与开发, 2022,49(3):513–521.
- Li Dongan, Qi Lixin. Full wave seismic exploration technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49(3):513–521.
- [24] 高峰, 彭琼. 量子态叠加与经典波叠加的本质区别[J]. 衡阳师范学院学报, 2021,42(3):40–44.
- Gao Feng, Peng Qiong. Essential difference between quantum states and superposition of classical waves[J]. Journal of Hengyang Normal University, 2021,42(3):40–44.
- [25] 栾添, 张雪松, 张先超, 等. 量子态和量子测量态的特性与应用[J]. 中国电子科学院学报, 2020,15(2):99–104.
- Luan Tian, Zhang Xuesong, Zhang Xianchao, *et al.* Properties and applications of quantum states and quantum measurement states[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020,15(2):99–104.
- [26] 尹军杰. 地震散射波场特征的数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.
- Yin Junjie. A study on seismic scattered wave characteristics by numerical simulating[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005.
- [27] 勾丽敏. 散射波成像处理技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- Gou Limin. A study on scattered wave imaging processing technique[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2007.
- [28] 赵晓鹏, 蒋辉, 赵永贵. 地震散射技术在盾构隧道海底孤石探测中的应用[J]. 隧道建设, 2019,39(增刊2):352–357.
- Zhao Xiaopeng, Jiang Hui, Zhao Yonggui. Application of seismic scattering technology in the detection of solitary rock on the seafloor of shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019,39(S2):352–357.
- [29] 李东安, 王梅生. 全波场地震采集[J]. 石油物探, 2023,62(4):82–95.
- Li Dongan, Wang Meisheng. Full wave field seismic acquisition[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023,62(4):82–95.