

文章编号: 1000-0747(2022)03-0513-09 DOI: 10.11698/PED.20220001

全波场地震勘探技术

李东安¹, 漆立新²

(1. 北京世纪金道石油技术开发有限公司, 北京 100029; 2. 中国石化西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011)

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技部项目(P21038-3)

摘要: 反射波地震采集设计基于层状介质假设, 信号分析过程压制了绕射波、散射波等弱信号, 反射波地震成像处理后频带狭窄, 这些均限制了原始宽频数据的充分利用。从均衡利用反射波、绕射波、散射波信息入手, 重新定义全波场地震勘探的内涵, 明确其特点和适应条件, 提出一套适用于全波场地震勘探的关键技术。在地震采集阶段, 需要采用多套观测系统或一次性部署分期采集设计, 即要在常规观测系统中镶嵌小面元、小偏移距、小道间距数据, 利用共中心点道集离散化、小偏移距高覆盖等方法, 增强原始地震数据中绕射波、散射波等弱信号的能量。在地震处理过程中, 原始地震数据中的信号与噪音需要重新定义, 通过多观测系统数据融合处理, 实现地震数据有效信号的增强; 通过不同面元、不同排列方式数据的差异化应用, 使不同态式地震波能被有效分解和分别成像。在地震解释过程中, 充分利用全波场地震资料, 依靠多尺度、多维度井-震标定, 实现多态式、多域地震属性解释, 揭示复杂岩性体的内幕结构, 提高非层状储集层横向分辨能力。

关键词: 全波场地震勘探; 多观测系统; 地震采集; 共中心点道集; 全波场数据处理; 地震属性

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

Full wave seismic exploration technology

LI Dong'an¹, QI Lixin²

(1. Beijing Century Kingdo Petroleum Technology Development Co. LTD, Beijing 100029, China;

2. Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi 830011, China)

Abstract: Reflected wave seismology has the following defects: the acquisition design is based on the assumption of layered media, the signal processing suppresses weak signals such as diffracted wave and scattered wave, and the seismic wave band after the image processing is narrow. They limit the full utilization of broadband raw data. The concept of full wave seismic exploration is redefined based on the idea of balanced utilization of reflected wave, diffracted wave and scattered wave information, its characteristics and adaptive conditions are clarified. A set of key technologies suitable for full wave seismic exploration are put forward. During seismic acquisition period, it is necessary to adopt multi geometry, i.e. embed small bin, small offset and small channel interval data in conventional geometry. By discretizing of common midpoint (CMP) gathers, small offset with high coverage, the weak signals such as diffracted wave and scattered wave in the raw seismic data can be enhanced. During seismic processing, the signal and noise in the original seismic data need to be redefined at first. The effective signals of seismic data are enhanced through merging of multi-geometry data merging. By means of differential application of data with different bin sizes and different arrangement modes, different regimes of seismic waves can be effectively decomposed and imaged separately. During seismic interpretation stage, making the most of the full wave seismic data, and adopting well-seismic calibration on multi-scale and multi-dimension, the seismic attributes in multi-regimes and multi-domains are interpreted to reveal interior information of complex lithology bodies and improve the lateral resolution of non-layered reservoirs.

Key words: full wave seismic exploration; multiple geometry; seismic acquisition; CMP gathers; full wave data processing; seismic attribute

引用: 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 Dong'an, QI Lixin. Full wave seismic exploration technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 513-521.

0 引言

复杂结构地质体识别是油气勘探开发的一大难题, 以反射波地震学为基础的传统地震勘探技术围绕提

高纵向分辨率展开, 采集设计以层状介质为假设, 信号处理压制了绕射波、散射波等弱信息。成像处理注重反射波, 限制了原始宽频数据的充分利用, 远不能满足对非层状、小尺度复杂地质体的地震地质解释要求。

人们很早就认识到地震波在地下传播的复杂性, 1964 年滕吉文^[1]提出地层中存在断层、尖灭等复杂界面时会产生绕射波, 并试图解决绕射波的动力学特征与介质波阻抗参数的关系问题。20 世纪 80 年代, 吴如山等^[2-3]研究了弹性波在非均匀介质中的传播, 提出不同尺度的非均质体对地震波的影响可以借助不同的传播态式进行研究。进入 21 世纪, 学者们普遍认识到地下不同尺度的非均匀地质体共生会形成极为复杂的、多种波相互干涉的地震波场, 认识到除反射波外, 绕射波和散射波在地震勘探中也有十分重要的利用价值, 并在物理模拟与地震成像方面做了大量工作^[4-7], 但基本上应用在信号分析与成像处理阶段, 极少从地震采集方法论证复杂波场。

2005 年 Criss 等^[8]提出了全波场地震采集处理技术, 2006 年余德平等^[9]在总结国外学者研究的基础上, 定义全波场地震勘探是一种全方位、全频带、全分量、高保真的矢量地震勘探, 概念上涵盖了宽方位采集、多波勘探、“两宽一高”地震勘探、单点检波器、低频震源激发等热点方向。关于全波场地震勘探, 不同学者有不同的理解, 但大都沿用反射波地震勘探思路, 以研究多波多分量、全方位、全频带、各向异性等反射波属性为主。

笔者认为全波场地震勘探是在反射波地震勘探的基础上, 尽可能获取有效的绕射波和散射波信号, 从地质体横向尺度出发, 针对地下复杂非层状储集层和流体进行的地震勘探。对反射波、绕射波、散射波等地震波传播态式的全信号采集、波场分离处理和联合解释才是真正的全波场地震勘探。鉴于目前缺少对绕射波、散射波与反射波联合地震勘探方法的全貌性概述, 缺少涵盖各应用环节的配套技术, 本文明确了全波场地震勘探与传统地震勘探的区别和适用条件, 提出了一套从采集、处理到解释的全波场地震勘探关键技术方案, 综合利用不同态式地震波的横向分辨能力, 探索提高非层状地质体成像精度。

1 全波场地震勘探概念及特征

1.1 非均匀地质体地震响应的 3 种有效传播态式

地球内部由多尺度非均匀地质体叠加构成, 层状介质只是地层结构的简化, 为描述不同尺度非均匀、非层状地质体的地震响应, 将广义地震波散射理论应用于地面地震勘探中, 全波场地震即是在地面激发接收条件下不同尺度地质体产生向后散射的集合。依据地质体的归一化波数, 即地质体的尺度与地震子波波数之积 (ka), 将地震波分为 3 种传播态式: 散射波

($ka \ll 1$)、绕射波 ($ka \approx 1$) 及反射波 ($ka \gg 1$)。其中, a 为非均匀地质体的尺度, k 为波数, 计算如下:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

从地震几何学角度, 经常用界面曲率半径表示地质体的尺度, 当地质界面曲率半径远大于地震子波波长时, 地震波传播遵从层状介质中的反射理论, 并沿着反射角等于入射角的方向传播; 当界面曲率半径约等于地震子波波长时, 入射波在弯曲界面发生绕射; 当界面曲率半径远小于波长时, 入射波在弯曲界面发生散射 (见图 1)。

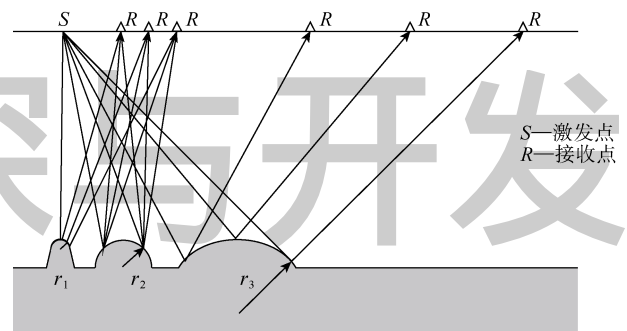


图 1 反射波、绕射波、散射波示意图

从地震波动力学特征表述地震波反射, 反射纵波的波动方程为:

$$\nabla^2 U - \frac{\partial^2 U}{v_p^2 \partial t^2} = 0 \quad (2)$$

发生绕射与散射时, 地震波不再具有单一的方向, 而是以入射点为中心向四面八方传播。在 Born 近似情况下, 绕射与散射纵波的传播方程为:

$$\nabla^2 U_s - \frac{\partial^2 U_s}{v_0^2 \partial t^2} = -\frac{a(x)}{v_0^2} \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} \quad (3)$$

(3) 式表明, 绕射波、散射波方程是一个被动源方程, 在外界振动的激发下, 波速异常体向周围发散地震波。

1.2 全波场地震勘探的特点

1.2.1 地质体尺度与地震波传播态式的对应关系

既然全波场地震是不同尺度地质体产生向后散射的集合, 地质体尺度分布范围与地震波传播的 3 种态式之间必然存在某种对应关系。光学原理表明, 地震波传播态式是地质体尺度与子波波数的函数, 所有尺度地质体都可以分解到反射波成像区、绕射波成像区和散射波成像区实现, 如图 2 所示。

3 种地震波态式也有各自的波数范围或波长范围。

①反射波成像区: 目标地质体 $ka \gg 1$, 如 $1 < ka < 100$,

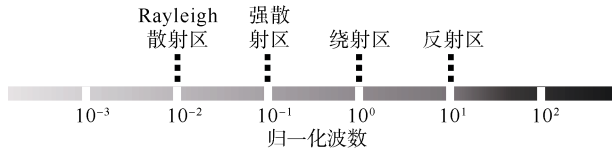


图2 不同态式地震波与地质体尺度的关系

满足菲涅尔带叠加要求,简称反射波,是位于几何光学区地震波向后散射的集合。②绕射波成像区:目标地质体 $ka \approx 1$,如 $0.1 < ka < 10$,边缘不满足菲涅尔干涉,简称绕射波,是反射/绕射区地震波向后散射的集合。③散射波成像区:目标地质体 $ka \ll 1$, $0.01 < ka < 1$,无菲涅尔带干涉,简称散射波,是绕射/散射区地震波向后散射的集合。3种传播态式下,对应的地质体尺度大致呈如下关系:

$$a_r \approx 10^1 a_d \approx 10^2 a_s \quad (4)$$

在地震子波主频为 30 Hz,地层层速度为 3 000 m/s,地震子波波长为 100 m 的条件下, $10^3/2\pi > ka > 10^1/2\pi$ 之间及更大区域主要为反射波成像区; $10^2/2\pi > ka > 10^0/2\pi$ 之间主要为绕射波成像区; $10^1/2\pi > ka > 10^{-1}/2\pi$ 或更小区域主要为散射波成像区。

地质体成像波段不仅受地质体尺度控制,同时也受地震子波的波数、地震波传播的距离、区域平均速度及与围岩波阻抗差控制。一般而言,反射波主要反映层状地质体的结构,而绕射波和散射波更能反映非层状复杂地质体的内幕结构。如果地震波的优势频率与最高无混叠频率足够高、信号足够强,则小尺度地质体也可落入反射波成像区。这也是能从反射波地震剖面上看到绕射、散射波成像的主要原因。

1.2.2 多态式地震波的物理特征

充分利用全波场地震信息,需要研究反射波、绕射波、散射波在物理特征方面的差异与相互关系,本文重点讨论频率、波长与强度 3 个方面的物理特征。

1.2.2.1 多态式地震波频率与强度

在均匀介质假设条件下,反射波、绕射波、散射波的强度与面积成正比^[10],由(3)式可知,三者之间的波场强度成对数关系:

$$A_r \approx 10^1 A_d \approx 10^2 A_s \quad (5)$$

各种态式地震波成像能量相当于对面积求积分,反射波能量最强,绕射波次之,散射波最弱。按照分贝谱使用 $20\lg A$ 的方式表达,若分别取中位数,三者之间有 20~60 dB 的差别(见图3)。

根据量子力学理论,小尺度地质体的固有频率较高,即分子的极化率以分子的固有振动频率作周期性变化^[11],由于谐振作用,散射波有较宽的频率成分。

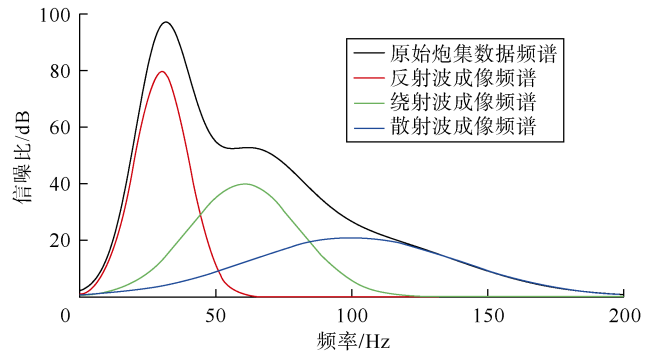


图3 不同态式地震波的能量与频率分布特征

根据经验,在原始全波场地震资料中,反射波数据分布在低频段,绕射波数据在中频段,散射波数据分布在较高频段。三者频带逐渐加宽,各有一个倍频程的差异。

1.2.2.2 多态式地震波波长与强度

基于光学原理,当介质尺度远小于入射波长时会产生瑞利散射现象,散射波的强度与入射波长的 4 次方成反比,与直径的 6 次方成正比(瑞利经验公式)。

$$A_s \propto \frac{a^6 (n^2 - 1)^2}{\lambda^4} \quad (6)$$

介质尺度与入射波长相当时,产生米氏散射(绕射波),米氏散射在经典光学原理中用麦克斯韦方程组推导出精确的数学表达式^[12],在地震波场中,绕射波的强度与入射波长的 2 次方成反比,与直径的平方成正比。

$$A_d \propto \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (7)$$

介质尺度远大于入射波长时,体效应产生拉曼散射的强度非常弱,这时可用镜面反射率衡量反射波的界面效应强度。

1.2.3 多态式地震波的空间分辨能力

反射波地震勘探阶段,通常认为地震波的横向分辨率主要受地震子波主频或子波波长控制,由 Sheriff 菲涅尔带、Lindsey 公式或者 Chen & Schuster 公式定义,横向分辨率(R)大小为 $\lambda/4$ 至 $2\pi\lambda Z_0/L_{\max}$ 之间,一般认为 $R \approx \lambda$ ^[13]。

在全波场地震勘探条件下,影响空间分辨率的因素更复杂,由于存在不同传播态式,横向分辨率主要受不同态式地震波的主频、带宽、最大有效频率等控制。为更直观地衡量地震横向成像精度,本文引入两个重要的指标。

①成像极值(Tr)^[14]。研究表明,特定采集参数与传播因素条件下,成像宽度极值趋于定值;②成像

放大系数。用目标地质体真实尺度与目标地质体成像尺度之比表示，即：

$$P=A/a \tag{8}$$

当成像放大系数 $P=1$ 时，横向成像精度最高（见图 4），目标地质体尺度小于某个极限值后， P 值开始增加，成像被放大，而传播态式从反射波过渡到绕射波、散射波时，成像极值逐渐变小。

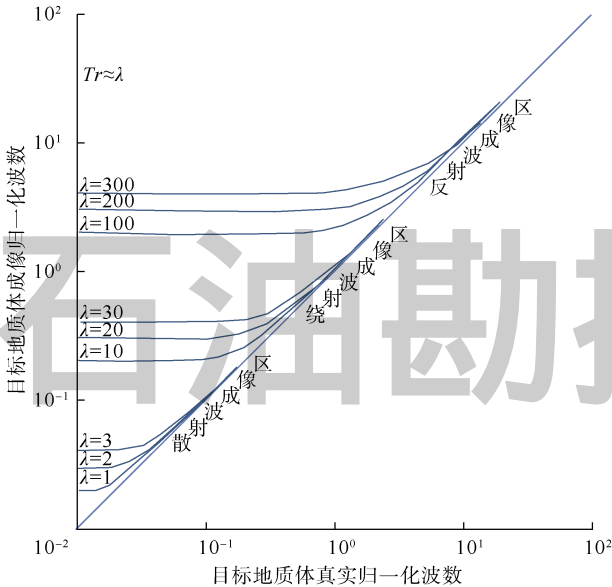


图 4 不同态式地震波下目标地质体真实尺度与成像尺度关系

不同传播态式下， Tr 收敛于纵坐标不同的位置，其差别呈对数关系：

$$Tr_r \approx 10^1 Tr_d \approx 10^2 Tr_s \tag{9}$$

实际上 Tr 与 λ 的关系较为复杂，也容易引起争论，Kallweit 等^[14]研究表明 $Tr=\lambda/4.6$ 。

按地震反射波、绕射波、散射波分别成像，成像极值和成像放大系数在逐级减小。在双对数坐标系统下，反射波成像、绕射波成像、散射波成像是对于地下目标地质体真实尺度的逐渐逼近。

1.3 全波场地震勘探与反射波地震勘探的异同

全波场地震勘探本质上是反射波、绕射波、散射

波联合勘探，或者说从反射波段、绕射波段、散射波段，解决地震勘探面临的各种尺度地质体的成像问题。同时，全波场地震勘探又是对反射波地震勘探技术的继承与发展，既能够继续利用长期积累的地震勘探技术与数据，又突出了量子力学与地震波散射理论在地震勘探中的创新；在实践中，既可以重新开展地震采集，也可以通过补充新的地震数据，实现全波场地震勘探。

反射波地震勘探与全波场地震勘探的差异表现在多方面：前者以层状介质为基础，研究全方位、全频带、全分量、高保真等反射波属性，后者基于非层状介质，研究反射波、绕射波、散射波 3 种态式下的地震属性；前者以地层界面为对象，基于经典力学和几何光学的确定性分析，地震成像本质上是对地质界面的位置描述，后者基于量子力学及波动方程的概率性分析，以不同尺度地质体为对象，地震成像的本质是对地质体尺度的统计描述。

由于是针对地下地质体复杂内幕结构的精雕细刻，实施全波场地震勘探也需要同时满足一定的条件，即需要锁定局部目标。一般情况下，需要有前期的三维地震资料，明确该区发育非层状复杂结构地质体，而且在勘探开发过程中又亟需知道这些非层状复杂地质体内幕特征，如勘探阶段对碳酸盐岩断溶体的刻画、开发阶段对油藏物性、含流体地质横向变化的描述等，这时就可以部署全波场地震勘探。

塔里木盆地奥陶系为典型的超深层、缝洞型非层状油气藏，为扩大断溶体油气藏规模，在某井区部署二次地震采集 150 km²，基于反射波地震勘探采用 12.5 m×25 m 面元，为精细落实区内探井井位及钻井轨迹，针对已知裂缝发育带与潜在断溶体发育区，提出全波场地震采集方案，局部镶嵌 2.5 m×2.5 m 面元，资料面积 9.9 km²，面覆盖面积 2 km²，采用小面元、小排列、高覆盖与常规面元、大排列组合，为后期波场分离及全波场成像提供基础数据（见表 1）。

表 1 塔里木盆地某井区全波场地震采集实验方案表

观测方式	面元/ m	接收 道数/道	道间距/ m	接收 线距/m	激发 点距/m	激发 线距/m	最大非 纵距/m	覆盖 次数/次	横纵比	炮道密度/ (10 ⁴ 次·km ⁻²)	束线距/m	施工 方式
大排列 观测方案	12.5×25	19 008	25	300	50	300	6 587.5	396	0.816	126.72	300（1 条排列）	井炮
小排列 观测方案	2.5×2.5	26 520	25	30	25	60	2 987.5	200	1	1 239.04	150（正常区 1 条排列， 加密区 5 条排列）	井炮

注：大排列观测方案采用 36L-6S-528T-396F 观测系统，小排列观测方案采用 221L-67S-120T-230F 观测系统

2 全波场地震采集

首先是针对地质目标,实现均衡的反射波、绕射波和散射波信息采集,其中关键的参数包括:制约小尺度地质体信号不失真的空间采样密度,制约绕射波、散射波等弱信号增强的排列长度、道间距的选择等,本文提出了实现全波场地震采集的若干新方法。

2.1 基于地质体尺度下限的超高密度空间采样

最小目标地质体尺度由勘探开发需求决定,在最小目标地质体的一个方向至少有 3 个采样值,即满足空间无假频采样:

$$B = L_{\min} / 2 \quad (10)$$

如要分辨宽度(L)为 60 m 的河道,采集面元(B)可选 30 m 间距;如果要分辨 6 m 的裂缝或断溶体,采集面元就要选 3 m。

反观反射波地震勘探,空间采样虽然有 4 条基本要求:①目标尺度在一个方向至少有 3 个样值;②满足横向分辨率条件;③满足最高无混叠频率;④满足 30° 绕射收敛。但是,反射波地震勘探通常不设定目标地质体尺度下限,反射波的横向分辨率成为确定空间采样间隔的主要因素,导致在常规三维地震采集中,空间采样取横向分辨率的一半为阈值,但不保证小尺度体的空间采样无假频。

超高密度空间采样是局部的,范围由高精度勘探的地质目标或高精度开发的油藏目标圈定,通过炮道密度控制等方法实现。

2.2 小尺度地质体信息接收的小排列长度

由于小尺度地质体的绕射与散射没有倾角概念,按照费马原理,绕射与散射正上方的自激自收是最短路径,这就如同地面一个共中心点的反射波信息是来自地下菲涅尔带的贡献,地下一个点产生的绕射/散射信息也主要被地面菲涅尔带内的检波器接收。正演模型同时表明,绕射与散射能量主要集中在小偏移距范围内,绕射与散射波信息需要依靠小排列接收(见图 5),其最大偏移距计算如下。

$$R_B = 0.5(\lambda Z_0)^{1/2} \quad (11)$$

因此,能被探测的小尺度地质体主要在靠近激发震源的最短路径附近,小尺度体产生的绕射波或散射波也主要被近炮检距范围内的检波器接收。

2.3 小尺度地质体的小道间距、高覆盖采集

如前所述,绕射波与散射波的能量非常弱,因此,在采用小面元、小排列的基础上,减小道间距、增加小排列的接收道数,提高近炮检距范围内的覆盖

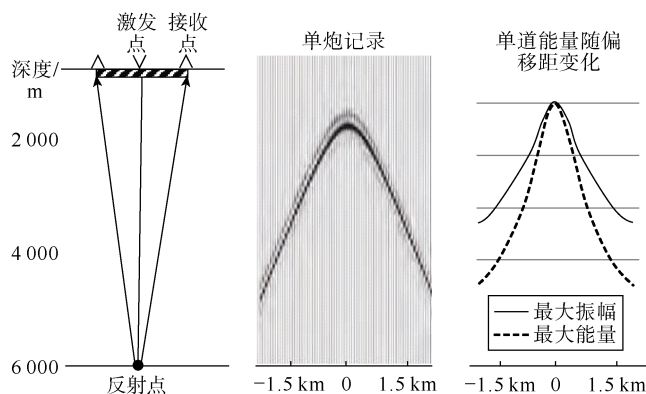


图 5 地下单点的背向散射炮检记录

次数是全波场地震采集的关键。由于小排列数据包含的绕射波和散射波成分更丰富,同时因为近道数据噪音背景强,采用 2 倍于最小面元的小道间距,将有助于突出信号并压制噪音。相同条件下,由于绕射波、散射波比反射波能量弱,为 40~60 dB,近炮检距范围内的覆盖次数较常规三维地震采集提高 10~100 倍有重要意义。

2.4 共中心点离散化实现超小面元采集

实现 1~5 m 的超小面元三维地震采集,炮道密度超过 1×10^7 道/ km^2 ,野外继续采用传统线束方式施工将非常困难。本文提出共中心点道集离散化,就是为了方便实现超小面元采集(见图 6),虽然从传统上共中心点道集与离散化是相互矛盾的,但从统计学原理分析,共中心点道集离散化提供了更为精确的信息。

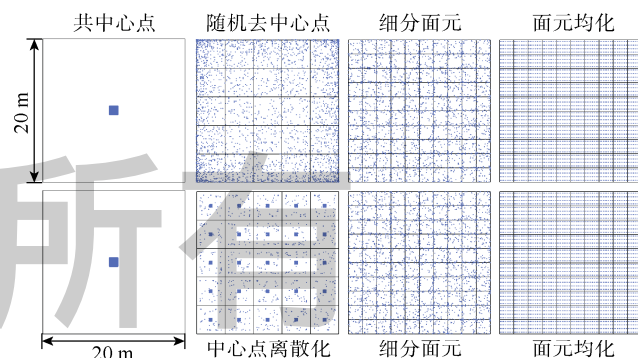


图 6 常规三维地震采集面元与面元均化后小面元对比

共中心点离散化的核心是逐步改变沿炮线、检波线施工的老方法,从不对称观测系统实现面元细化入手,进而设定炮点、检波点的随机偏移量,然后过渡到按照块单元设定炮道密度的方法,确定炮点位置与检波器的布设,通过炮检点实时测量、观测系统实时控制软件支持,保证道间距、偏移距、方位角、覆盖次数等参数符合设计要求,最终实现共中心点在空间

随机分布。

2.5 多观测系统应对多尺度地质体

针对不同尺度地质体,全波场地震采集需要设计相对应的观测系统以及不同的采集参数。对不同产状和埋深的层状反射体,需要大偏移距数据,背景速度场资料也依靠较大炮检距的数据提供;对无产状与倾角较小地质体,需要小偏移距数据,而且由于散射体能量弱,更需要通过小偏移距多次覆盖技术压制噪音、提高信噪比^[15]。因此,在单次地震采集过程中,需要设计两套或两套以上观测系统是全波场地震采集的特点(见图7)。同时,不同观测系统多次采集的新老数据,必须能够叠加,重点区可加密,空间采样精度可提高。

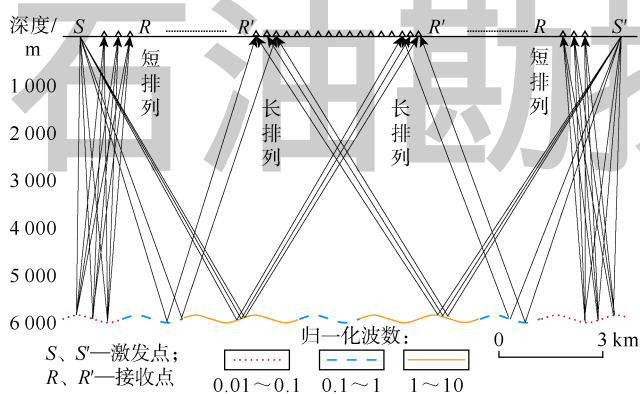


图7 针对多尺度地质体的多观测系统

常规地震勘探中没有专门针对绕射波和散射波的观测系统设计,但针对局部复杂目标,全区采用单一观测系统,既不经济也不现实。

2.6 可控震源与无线数字检波器

超高密度地震采集需要提高震源的密度与震检比,进而提高地震激发的效率,这就使可控震源成为首选。同时,无线数字检波器可以提高接收道数,更适应灵活的观测系统方式,更方便于野外布设。

超高密度与超小面元也使单点检波器后期室内叠加取代野外组合检波器串压噪成为可能,实践表明,在超小面元内,单个检波器10次覆盖的压噪效果明显优于10只检波器的道内组合。

3 全波场地震数据处理

全波场地震数据处理的重点在于差异化应用不同面元尺寸、不同排列方式数据,通过数据分析与数据融合,利用多观测系统的优势,信号分析中补充应用小面元、小排列、小道间距数据,实现不同态式地震波的数字解析及不同尺度地质体的成像,本文提出了

一套面向非层状复杂地质体地震处理的技术。

3.1 通过数据分析重新认识信号与噪音

开展全波场地震数据处理时,信号与噪音的重新界定是非常重要的工作之一。事实上,在基于反射波理论的信号分析过程中,许多绕射与散射信息作为噪音被压制。在全波场地震采集观测方式下,单炮记录包含了丰富的地震波信息,由原始共炮点数据按一定方式重排得到共检波点、共中心点、共偏移距、十字域、OVT域(宽方位矢量偏移距)等多域及不同叠前子集的数据重排,以更有效地识别信号与噪音。除去折射波、面波、有源干扰之外,绕射波、散射波、随机干扰、次生干扰波等均应保留。

图8表明,在非层状介质中,界面不再是主要研究对象,颗粒体及其尺度的其他地质体成为对象,在单炮分析及后期的一系列多域数据分析中,噪音需要重新定义,信号也需要被重新认识。

①重新建立压噪方案。保护传统地震数据处理过程中被认为是随机干扰、次生干扰的地震信号,如来自目的层段的小尺度体、非均质体等产生的绕射或散射波。但也不是所有的散射波信息都要保留,需要同时压制来自浅表层的强散射波。有分析表明,浅表层强散射形成的多次散射是中深层环境噪音的主要成分。

②有效分离信号。利用多观测系统和小炮检距数据组合与叠加,提高目的层段绕射波与散射波的能量,进而研究地震勘探中反射波、绕射波、散射波之间的关系,明确相互之间的重叠性和差异,提升高频端弱信号的信噪比,最终提高有效波的空间分辨率。

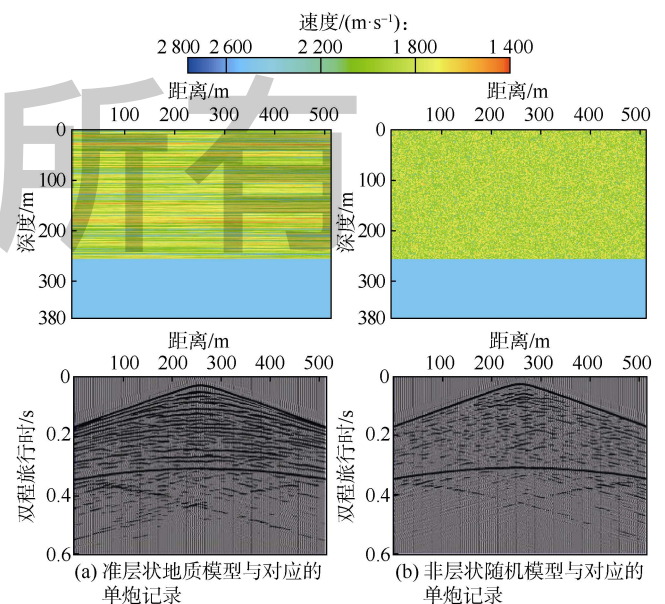


图8 准层状模型(a)与非层状随机模型(b)单炮记录对比

3.2 数据融合与弱信号增强处理技术

对于全波场地震数据处理而言,由于使用了多观测系统采集的高密度原始地震资料,或者需要叠加不同时期采集的原始地震资料,相对于常规处理,数据融合是地震信号处理需要增加或完善的技术,即从时间、空间、属性3方面达到信息互补,增强绕射波、散射波等弱信号,以均衡利用目的层段反射波、绕射波与散射波信息。此外还包括以下技术:统一基准面技术,解决多观测系统静校正问题,实现原始数据无时差融合;匹配技术,消除因近地表条件变化引起的能量差异、频带差异、相位差异、激发方式与子波差异等;小面元压噪技术,利用小面元、小道间距数据波场连续的优势,压制环境干扰、线性噪音,实现更高精度保真去噪;近道信号增强技术,利用密集接收的小炮检距数据叠加,提高绕射波、散射波等弱信号的信噪比;数据插值技术,针对小面元内数据不规则或缺大偏移距数据的情况,采用5D插值或压缩感知等技术进行数据重构和规则化处理;高精度速度建模技术,在大面元速度场的基础上,利用小面元数据细化速度模型,进一步提高速度场的精度。

图9是多观测系统下的数据融合与信号处理流程,利用小面元、小偏移距、小道间距、高覆盖处理,实现绕射波、散射波等弱信号增强。笔者目前已利用部分油田多期采集的三维资料完成了数据融合处理试验,并实现了对绕射波、散射波等弱信号的增强处理。

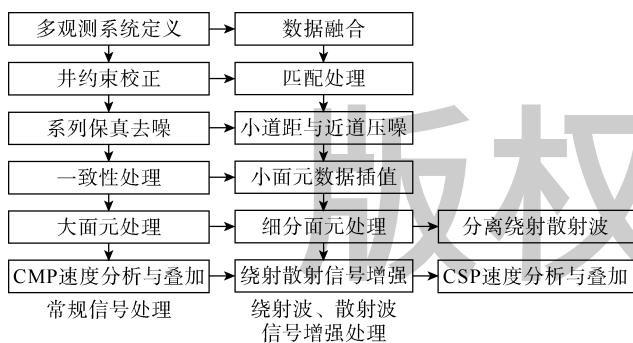


图9 多观测系统下的数据融合与信号处理流程

3.3 波场分离技术

目前波场分离的主要手段是基于射线走时,利用数学方法,实现对特定传播态式的地震波放大和压制。

平面波域绕射波分离。在平面波道集上进行绕射波分离,利用Radon变换,将共炮点道集转换到射线参数域,然后对射线参数道集按照射线参数抽取,认

为获得了平面波道集。利用平面波域绕射波与反射波时距曲线存在的几何差异,用滤波器对绕射波分离。

倾角域绕射波分离。通过绕射波与反射波在倾角域共成像点道集(CIG)上的显著差异实现分离,主要有以下3种方法:利用平面波解构滤波技术分离;利用中值滤波实现倾角域CIG上的绕射波能量提取;利用抛物扫面压制反射顶点能量结合Radon变换提取绕射波。

共偏移距域绕射波分离。通过绕射波与反射波在共偏移距道集上的显著差异实现分离。

基于能量与频率差异的反射波与散射波分解技术尚处起步阶段,正在进一步探索。

3.4 全波场成像技术

实现反射/绕射/散射波联合成像,是全波场数据处理研究的目标,国内学者利用零阶几何射线理论和高斯波束叠加等波场高频表示来近似Green函数,并将Kirchhoff积分推广到非均匀各项同性或异性介质。在取得小面元、小道间距、小炮检距数据之后,地震散射波成像(EOM)方法也会有更充分的应用空间,其核心是取得基于等效偏移距的共散射点道集(CSP),其等效偏移距公式为^[16]:

$$h_e^2 = x^2 + h^2 - \left(\frac{2xh}{tv} \right)^2 \quad (12)$$

引入源于量子散射理论的Born近似和源于无线电物理的Rytov近似之后,广义散射条件下的地震成像发生质的变化,两种近似算法既解决了向后散射问题,也解决了由绕射波面积效应向散射波体积效应递进的问题^[10]。全波场地震数据的正演方程与全波场成像的数学物理方程均可以表示为Born近似条件下的散射波场^[17]:

$$P_1 = P(x) - P_0(x) \quad (13)$$

$$P_1 \approx \omega^2 \int W(\omega) m(x') G_0(x'|x_s) G_0(x|x') dx' \quad (14)$$

(13)式为计算散射波场的非线性方程,(14)式为其对应的线性方程。

全波场地震数据处理能够充分接收和利用原始数据中不同传播态式的波场,并超越传统分辨率的概念,提高不同尺度地质体的成像精度,特别是对介质非均质性的精细刻画。

4 全波场地震解释

全波场地震处理得到的大量数据,如何充分挖掘其内在价值,高效高精度解释小尺度、非层状地质体

内幕岩性变化、流体变化,是一直在攻关的难题,限于目前全波场地震采集与处理尚未完全展开,本文仅就可能的关键解释技术问题探索性讨论。

4.1 多尺度、多维度属性井-震标定技术

全波场地震解释一定是多比例尺的,无论是纸剖面还是解释系统,通常采用空间 1 cm 显示 10 道,大致 200 m,横向比例尺为 1:20 000,纵向 1 cm 代表 100 ms,平均速度为 4 000 m/s 时,每刻度大约 200 m,纵向比例尺为 1:20 000。由于实现了 2 m 或更小面元成像,空间每 1 cm 继续显示 10 道,横向比例尺为 1:2 000,纵向比例尺也保持为 1:2 000 左右,则纵向 1 cm 代表 10 ms。如果要保证解释比例尺在 1:2 000 与 1:20 000 之间自由转换,桌面显示器尺寸显然不够,可能需要更大的显示器支撑地震解释。

井-震标定也随着比例尺的放大体现多维度特征,由界面标定转向岩性标定、物性标定。例如,西北地区碳酸盐岩缝洞型油藏,按照全波场和散射波场分别成像,当地震数据与实钻井轨迹结合时,对提高钻井位置精度与内幕解析帮助巨大。

4.2 多态式、多域地震属性解释技术

反射波、绕射波、散射波多态式联合解释是在统一速度场背景下,对同一物理位置按照不同尺度的成像解析(见图 10)。反射波以反映地层层状格架为主,成像尺度在 10 m 以上,绕射波以反映断层、挠曲、地层终止与异常体轮廓为主,成像尺度为 1~100 m,散射波场主要反映 0.1~10 m 小尺度异常体,反映岩性、物性或流体的变化。并可在分方位、分偏移距、分角道集、叠前 AVAZ(方位各向异性振幅反演)等多域,显示波形、振幅、频率、相位、相干等地震属性。

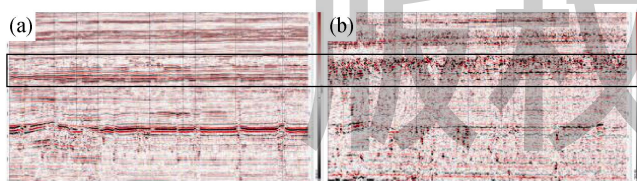


图 10 反射波(a)与散射波(b)成像剖面对比

4.3 地震解释与地理信息系统融合技术

全波场地震解释系统叠加全球地理信息系统(GIS)系统将会是更实用的数字化转型^[18],相较于早前提出的虚拟现实系统,全波场地震数据与 GIS 结合将是高像素、多维度的。可满足工业制图与油气勘探、开发高精度的要求,实现米级尺度下的连续缩放,并借助 GIS 系统强大的技术支撑,解决在油田空间数据

库的地震地质资料与钻、采、测、录、试井资料结合过程中的数据交换问题。

5 结论

全波场地震的实质是反射波、绕射波、散射波联合勘探,在遵循散射波成像理论的基础上,继承了反射波地震勘探的所有成果,解决了现实中无法单独开展散射波地震勘探的问题。采用一次采集多观测系统或一次部署分期加密观测系统,以及共中心点面元内道集离散化设计,在常规观测系统中叠加小面元、小炮检距数据,增加原始地震数据中绕射波、散射波等宽频弱信号的能量。重新认识信号与噪音,通过对非规则高密度数据的面元细化、数据规则化,压制规则噪音与环境噪音,加强目标段绕射与散射信息。从研究反射波、绕射波、散射波在能量与频率等属性差异入手,通过几何解析与波动解析,研究绕射波、散射波的传播,实现波场分离与高分辨率成像。全波场地震勘探涵盖横向尺度 $10^{-1} \sim 10^4$ m 地质体目标,依靠多尺度井-震标定,实现多域、多态式地震属性解释,推动高精度勘探与高效开发。全波场地震勘探以目标为导向,将实现空间、时间域连续的、基于量子力学理论的地震采集与成像。

符号注释:

a ——目标地质体真实尺度, m; a_r 、 a_d 、 a_s ——反射、绕射、散射波段的地质体横向尺度, m; $a(x)$ ——波阻抗异常的分布, %; A ——目标地质体成像尺度, m; A_r 、 A_d 、 A_s ——反射波、绕射波、散射波的强度, W/m^2 ; B ——采集面元长度, m; $m(x)$ ——介质扰动方程; n ——表面折射率, %; h ——炮点到检波点的一半距离, m; h_e ——等效偏移距, m; $G_0(x'/x)$ ——格林函数; k ——波数, 无因次; L_{min} ——目标地质体最小尺度, m; P ——成像放大系数; P_0 、 P_1 ——背景波场及散射波场; r_1 、 r_2 、 r_3 ——界面曲率半径; R ——横向分辨率, m; R_B ——针对绕射波与散射波成像专设计的小排列最大偏移距, m; t ——从炮点到检波点的旅行时, s; Tr ——成像极值, m; Tr_r 、 Tr_d 、 Tr_s ——反射波、绕射波、散射波的成像极值, m; U ——纵波位移, m; U_i ——入射波位移, m; U_s ——绕射波/散射波位移, m; v ——地下散射点处的波速, m/s; $\bar{v}$ ——地下散射点处的均方根速度, m/s; v_p ——纵波速度, m/s; v_0 ——介质的区域背景波速, m/s; $W(\omega)$ ——频谱方程; x ——散射点在地面投影处到炮检中心点的距离, m; x_s ——脉冲震源位置, m; Z_0 ——目标地质体埋深, m; λ ——地震子波波长, m; ω ——圆频率, Hz。

参考文献:

[1] 滕吉文. 绕射波的动力学特性与介质物理参数间的关系[J]. 地球

- 物理学报, 1964, 13(2): 128-147.
- TENG Jiwen. The relationship between the dynamic characteristics of the radiation wave and the physical parameters of the medium[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1964, 13(2): 128-147.
- [2] WU R, AKI K. Scattering characteristics of elastic waves by an elastic heterogeneity[J]. Geophysics, 1985, 50(4): 582-595.
- [3] 吴如山, 安艺敬一. 地震波的散射与衰减[M]. 李裕澈, 卢寿德, 译. 北京: 地震出版社, 1993.
- WU Rushan, AKI K. Scattering and attenuation of seismic waves[M]. LI Yuche, LU Shoude, Trans. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [4] 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]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2002, 34(4): 559-568.
- [5] 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.
- [6] 黄建平, 张晴, 张凯, 等. 格林函数高斯束逆时偏移[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 101-106, 303.
- HUANG Jianping, ZHANG Qing, ZHANG Kai, et al. Reverse time migration with Gaussian beams based on the Green function[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(1): 101-106, 303.
- [7] 沈鸿雁, 李庆春, 边建民. 基于点散射地震-地质模型的地震散射波成像[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(4): 615-622.
- SHEN Hongyan, LI Qingchun, BIAN Jianmin. Seismic scattering wave imaging based on seismic-earth model of point scattering[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(4): 615-622.
- [8] CRISS C J, KIGER C, MAXWELL P, et al. Full-wave seismic acquisition and processing: The onshore requirement[J]. First Break, 1970, 23(2): 53-61.
- [9] 余德平, 严建文, 吴继敏. 全波场地震勘探技术[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 472-477.
- SHE Deping, YAN Jianwen, WU Jimin. The full wave field seismic exploration[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 472-477.
- [10] 孙建国. 高频渐近散射理论及其在地球物理场数值模拟与反演成像中的应用: 研究历史与研究现状概述以及若干新进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1231-1259.
- SUN Jianguo. High-frequency asymptotic scattering theories and their applications in numerical modeling and imaging of geophysical fields: An overview of the research history and the state-of-the-art, and some new developments[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1231-1259.
- [11] Л.Д.朗道, Е.М.栗弗席兹. 量子力学: 非相对论理论[M]. 严肃, 译. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- ЛАНДАУ Л Д, ЛИФШИЦ Е М. Quantum mechanics: Non-relativistic theory[M]. YAN Su, Trans. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [12] 马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论: 上[M]. 杨葭荪, 等, 译. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- BORN M, WOLF E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light: Part I[M]. YANG Jiasun, et al, Trans. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [13] 徐颖. 溶洞型储层成像分辨率分析[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(2): 194-199.
- XU Ying. Analysis of karst cave imaging resolution[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(2): 194-199.
- [14] KALLWEIT R S, WOOD L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets[J]. Geophysics, 1982, 47(7): 1035-1046.
- [15] 李东安. 面向非层状介质的全波场地震勘探[R]. 成都: 中国石油学会 2021 年物探技术研讨会, 2021.
- LI Dongan. Full-wave field seismic exploration for non-layered media[R]. Chengdu: 2021 Geophysical Exploration Technology Seminar of China Petroleum Society, 2021.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 黄翠叶. 基于 GIS 的地震勘探解释评价数据库的建设[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- HUANG Cuiye. Database construction of seismic interpretation and evaluation based on GIS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- 第一作者简介: 李东安 (1963-), 男, 江苏兴化人, 学士, 北京世纪金道石油技术开发有限公司高级工程师, 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 号华亭嘉园 A 座 26C, 北京世纪金道石油技术开发有限公司, 邮政编码: 100029。E-mail: lidongan@kingdo.com.cn
- 收稿日期: 2021-12-20 修回日期: 2022-02-21
- (编辑 黄昌武)