

王华忠.“两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析[J].石油物探,2019,58(3):313-324

WANG Huazhong.Key problem analysis in seismic exploration based on wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data [J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 313-324

“两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析

王华忠

(波现象与智能反演成像研究组(WPI), 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092)

摘要: 油气地震勘探面对的地下介质情况(包括地表条件)和油藏情况日益复杂促使地震勘探技术不断提高, 最终目的是能够尽可能精确地描述油气藏以及提高油气采收率和勘探效益。2000 年后逐渐普及的“两宽一高”地震勘探技术是其中的一项标志性技术, 它是一种综合性的技术系列, 并非仅指将地震数据采集技术推进到“两宽一高”阶段, 它还包括针对“两宽一高”数据的地震成像处理技术、地震地质解释技术及油藏评价技术。当前, “两宽一高”地震数据采集技术的发展较为迅速, 各种新的观测系统、新的震源和检波器系统以及高效、自动、智能数据采集新技术层出不穷。但是, 从海量的“两宽一高”数据中提取与精确描述储层相关信息的技术进展严重滞后, 譬如全波形反演(Full Waveform Inversion, FWI)和最小二乘逆时深度偏移(Least Squares Reverse Time Migration, LS-RTM)技术距离大规模生产实用(尤其是直接贡献于储层描述的应用)相去甚远。从地震波反演成像对地震数据采集的需求出发, 较为全面地依次分析了“两宽一高”地震数据采集技术对地震波成像的必要性、“两宽一高”地震数据对地震波成像的贡献、“两宽一高”地震勘探阶段的地震分辨率、“两宽一高”地震数据成像处理中的关键问题等, 最后简述了“两宽一高”地震勘探中地震地质解释的观点。认为“两宽一高”油气地震勘探技术是今后相当长时期内石油工业界的核心技术, 当前的技术发展现状远未达到“两宽一高”地震勘探技术的成熟阶段, 今后油气地震勘探的技术发展应该是围绕着“两宽一高”地震勘探的关键问题, 即采集技术、对应的反演成像技术、地震解释技术和油藏描述技术而展开。

关键词: 复杂介质与复杂储层; “两宽一高”地震勘探; “两宽一高”地震数据采集; 海量数据处理; 反演成像; “两宽一高”地震地质解释; “两宽一高”油藏描述

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-1441(2019)03-0313-12

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1441.2019.03.001

Key problem analysis in seismic exploration based on wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data

WANG Huazhong

(Wave Phenomena and Intelligent Inversion Imaging Group (WPI), School of Ocean and Earth science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The increasing complexity of surface, subsurface, and reservoir conditions requires a continuous improvement of seismic technologies for oil and gas exploration, with the ultimate goal of accurately describing the reservoirs to improve the efficiency of exploration and exploitation. One of the key technologies in the field, which has become increasingly popular in the 21st century, entails the interpretation of wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data. This technology features a comprehensive set of tools: in addition to the acquisition of seismic data, it also offers seismic imaging and processing, geological interpretation, and reservoir evaluation using wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data. Currently, a relatively rapid development of the technology for the acquisition of wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data is underway. Various technologies for identifying geometries and seismic sources, as well as new detector systems, are emerging one after another. However, the technical progress in the methods for extracting reservoir-related information from large amounts of wide-azimuth, high-density, and broad-

收稿日期: 2019-01-21; 改回日期: 2019-02-22。

作者简介: 王华忠(1964—), 男, 教授, 主要从事地震波传播、地震数据分析和地震波反演成像方面的研究工作。Email: herbhuak@vip.163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41774126)和国家科技重大专项(2016ZX05024-001, 2016ZX05006-002)共同资助。

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.41774126) and the National Science and Technology Major Project of China (Grant Nos.2016ZX05024-001 and 2016ZX05006-002).

band seismic data is significantly slower. For instance, the FWI and LS-RTM technologies are far from being practical for mass production (especially for applications that directly contribute to the reservoir description). This paper analyzes a series of problems related to wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data, from the need of seismic acquisition for seismic imaging, and the key problems related to it, to the contribution of wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data to seismic imaging, and the seismic resolution that can be obtained by using such data. In addition, this paper briefly introduces the viewpoint of seismic geological interpretation for wide-azimuth, high-density, and broadband seismic exploration. Finally, it is prospected that the seismic exploration technology using wide-azimuth, high-density, and broadband data is going to remain the core technology of oil industry for a long time. However, the current state of technological development of the seismic exploration technology using wide-azimuth, high-density, and broadband data is far from being mature. A technological development should be carried out in the future around the key issues of the seismic exploration with wide-azimuth, high-density, and broadband data, namely the acquisition, seismic inversion imaging, seismic interpretation, and reservoir description techniques.

Keywords: complex medium and reservoir, seismic exploration with ‘wide-azimuth, high-density, and broadband’ data, seismic data acquisition using ‘wide-azimuth, high-density, and broadband’ data, big data processing, inversion imaging, seismic geological interpretation using ‘wide-azimuth, high-density, and broadband’ data, reservoir description with ‘wide-azimuth, high-density, and broadband’ data

2000年后,油气地震勘探技术的发展有了快速的变化。油气地震勘探已经进入了面对复杂构造、复杂油藏(岩性油藏和隐蔽油藏)和深层/超深层(包括深水)油藏的阶段;地震数据采集逐渐进入了以“两宽一高”采集方式为核心的阶段;地震波成像逐渐进入了弹性参数(主要是角度反射系数和/或宽带波阻抗)反演成像的阶段(甚至地震波成像的理念也在由线性高斯反演成像逐渐转变为非线性非高斯反演成像);机器学习和人工智能开始有效地进入地震数据成像处理与地震地质解释领域。

油气地震勘探的对象也在发生着显著的变化。由横向缓变的层状介质为主的构造油藏的勘探向复杂岩性和隐蔽油藏的勘探转移;由横向缓变的层状介质为主的简单构造情况的勘探向横向剧变介质为主的复杂构造情况的勘探转移;由面向大尺度构造油藏的勘探向面向小尺度复杂油藏的勘探转移。

与此相对应,地震波成像的思想与方法也必然发生变化。由定位反射/散射点位置的偏移成像(Migration)向估计反射系数和弹性参数扰动量的反演成像(Inversion)转变;由针对带限反射系数的反演成像向全波数带或宽波数带的弹性参数(主要是波阻抗)估计转变;由线性高斯假设下的反演成像向非线性非高斯假设下的反演成像转变。地震波成像越来越依靠 Bayes 估计理论框架实现。地震信号分析与弹性参数估计在 Bayes 估计理论下正在逐渐地融为一体。现代图像分析方法在小尺度异常体和强变化异常体参数反演的正则化中起着越来越重要的作用,极大地促进了反演与建模精度的提升。地震波成像不断向信息综合利用的方向发展。2018年的SEG年会上,机器学习方面文章的暴增预示着机器学习和

人工智能真正开始进入油气勘探领域。地震波反演成像永远是在信息不全条件下寻找最佳解的过程。

地震波成像方法技术的转变体现在:应对复杂的“两宽一高”观测、同时源观测与连续源观测、被动源观测、压缩感知(Compressed Sensing)随机采样和多物理量观测等新的地震采集方式获得的新数据类型的处理和成像问题;应对由各向同性声波介质转移到VTI、TTI、T-ORT、吸收衰减(Q)和弹性介质提出的新的成像问题;应对由定位反(散)射点空间位置为目标的结构成像转移到由参数估计为目标反演成像提出的新的成像问题;应对由物理方程控制下的叠前数据成像问题转移到由数据驱动的各种处理与成像问题。

上述所有变化都离不开地震数据采集技术的进步,否则都会变成无源之水、无本之木。计算机技术的进步对促进上述变化起到了巨大的推动作用。地震数据采集技术的进步可以用“两宽一高”采集技术作为代表,其中的内涵是非常丰富的,包括采样理论由 Shannon 采样发展到压缩感知(随机)采样;宽方位、高密度和宽频带的地震数据采集;“两宽一高”地震数据采集的高效实现方式,即同时源采集、各种自动化采集技术、各种(单点)节点检波器、低频与宽频可控震源与海上可控震源等等。正是“两宽一高”的地震数据采集技术的发展支撑着地震成像质量的逐步提高及勘探效益的提升。

以FWI+LS-RTM为代表的地震波反演成像技术是勘探地震领域中的另一项代表性技术。在FWI思想的引领下,地震波成像技术在2000年以来得到了长足的发展。速度建模的精度和自动化程度明显提升,以最小二乘叠前深度偏移(Least Squares Pres-

tack Depth Migration, LS_PSDM)为标志的保真成像技术成为各大石油公司及地球物理服务公司着力发展的技术,偏移成像的分辨率和保真度显著提高,改善了油藏描述的精度。

机器学习理论及相关技术已开始应用于地震数据解释领域。

尽管如此,“两宽一高”地震勘探技术远未达到比较成熟的阶段,真正意义上的“两宽一高”数据采集并未实现;巨量的“两宽一高”数据体中蕴含的与储层有关信息的挖掘技术更是相差甚多;对应的地震地质解释技术大多还停留在定性阶段。

本文试图对“两宽一高”地震勘探技术的现状、技术要点和进一步发展的方向做出综合性分析与评价。分析“两宽一高”地震数据采集技术对地震成像的必要性、“两宽一高”地震数据对地震成像的贡献、“两宽一高”地震勘探阶段的地震分辨率、“两宽一高”地震数据成像处理中的关键问题,并简述对“两宽一高”地震勘探中地震地质解释的观点,以促进“两宽一高”地震勘探技术在石油工业中的深入应用。

1 对“两宽一高”地震勘探技术的需求分析

油气地震勘探的最终目标是预测含油气储层。当前,油气地震勘探面向复杂的近地表条件(地表高程变化大、地表岩性横向变化剧烈)、复杂的地下介质情况(各向异性、吸收衰减)、复杂的构造情况(剧烈横向变速、盐体、断块和断层等)和复杂的储层类型(岩性油气藏、隐蔽油气藏、小尺度及薄互层油气藏、火山岩油气藏和缝洞型油气藏等)。

对含油气储层的定位、形态刻画、岩性描述和流体预测,主要依赖地震波偏移成像和反演成像的结果。地震波成像的精度严重依赖叠前地震数据的质量。地震数据采集是整个油气地震勘探链条中居于前端的重要环节。在上述复杂勘探条件下,对叠前地震数据采集技术及所获取的叠前数据质量的要求必然大幅度提升。

前已述及,当前的地震波成像已经逐渐进入到以估计地下介质弹性参数为目标的反演成像阶段。在激发接收为宽带的情况下,从五维空间(即中点坐标 (m_x, m_y) 、半偏移距 (h_x, h_y) 、双程旅行时 t)看,采集到关于相干噪声和各种波现象对应波场的完整连续值是理论上最完备的地震数据体。虽然这样的数据能满足地震数据去除噪声和反演成像的需求,但在采集技术上是不能实现的。因此,需要明确提出满足

勘探需求的、精确的地震波成像需要什么样的叠前数据体。地震数据采集环节基于这样的需求分析发展适应的采集技术。

高精度地震波成像对叠前数据采集的基本要求^[1]:①对目标地质体有宽角度的、均匀的照明,这需要宽方位和长偏移的观测;②对目标地质体有能量足够的照明,这还需要有足够多的激发炮点且足够强的单炮激发能量;③观测到的反(散)射子波在多域中(单炮域、CMP域、OVT域等)存在一致性,即要求炮与炮和道与道之间的反(散)射子波在振幅、相位和频带上保持一致性,这是线性高斯假设下的去噪声方法和地震波成像方法对数据的本质要求;④观测到的反(散)射子波具有较宽的频带范围,譬如 $2\sim 80$ Hz,期望具有5个以上的倍频程;⑤能对波场和相干噪声进行无假频采样,既要进行高密度的检波端采样,共检波点道集也要能实现无假频采样。简而言之,高精度地震波成像需要“两宽一高”叠前地震数据。

本文给出了地震波成像所需叠前数据体的比较严格的定义:任一反射界面上,沿界面均匀分布着同样属性的立体观测角。每个立体观测角存在等间隔的圆环,圆环上均匀分布着“局部”炮点和检波点。炮检点的空间采样满足采样定理(不产生假频)。立体观测角张角足够大。“局部”炮检点产生的能量均匀,入射子波波形一致。

地震数据采集必须与叠前深度偏移(PSDM)和偏移速度估计的要求紧密地结合在一起。据此,本文给出更为明确的对叠前数据的需求说明:相对于一个共反射点(CRP)即地下成像点,照明张角要足够大(即偏移距足够大),张角增量要均匀,角度增量尽可能小。方位角最好是全方位(360°)的或宽方位的,方位角增量要均匀,角度增量尽可能小。CRP点之间照明覆盖次数尽量一致,无论是浅层的CRP点或是深层的CRP点,要求一样。每个CRP点的照明都要满足上述要求,即各CRP点间的照明要求(指的是照明覆盖次数)一致。依据这样的要求设计复杂地表和复杂构造探区的观测系统是合理的,但很难做到。

更进一步地,在层状介质假设下,从地表(或地下)面元的角度看,地震数据采集的基本原则:①每个地表(或地下)面元包含所有可能的偏移距和方位角;②各面元之间的偏移距和方位角的分布都一致。根据面元内的覆盖次数和这些覆盖次数对应的炮检点位置分布的多样性来评价观测系统的优劣是在水平层状介质假设条件下审视炮检点布设时的合理要求。实质上,就是要求每个CMP面元的玫瑰图显示出基本相同的覆盖次数、方位角展布均匀、偏移距展布均

匀。按照这样的要求设计观测系统是当地震数据采集中的基本做法,但是针对复杂的地下介质情况,这样设计出的观测系统不一定满足高精度成像的要求。

基于上述从复杂到简单的勘探目标对叠前地震数据的要求,野外地震数据采集时可以设计出合适的观测方式,匹配合适的震源和检波器系统,得到具体探区的叠前数据体。因此本文建议:将多维数据体视为一个有机的整体,从多维数据体的角度看待地震数据(相干噪声和波场)采集、去噪和地震波成像,可以显著地提升认识水平,进而改善各环节的工作效果。

据此可以看出,“两宽一高”地震数据采集是高精度地震成像的基本要求。但是,要真正地实现满足地震波成像处理要求的“两宽一高”地震数据采集却是非常困难的,当前的地震波成像都是在很不完全的叠前地震数据上进行的地下地质构造和岩石弹性参数的近似估计。一般情况下,背景(各向异性)速度建模和基于背景速度的地震波偏移成像结果基本上可以满足相对简单情形下的油气勘探的需求。但是针对上述复杂的近地表条件、地下介质情况和储层类型,必须大幅度提高叠前地震数据的质量,才能更好地解决将来的油气勘探问题。

“两宽一高”油气地震勘探是一项综合性的技术系列,居于油气地震勘探领域的中心地位。它不仅指“两宽一高”地震数据采集技术,更包括要挖掘出海量观测数据中包含的与储层有关信息的先进方法技术。对油气储层进行更精确的描述,并延伸到储层开发阶段,进而提高整个勘探开发过程的经济效益,这才是“两宽一高”地震勘探的真正目标。

2 “两宽一高”地震数据采集技术的发展现状

地震数据采集是油气地震勘探的核心环节,地震波成像质量的改善、地震地质解释精度的提高,甚至油气勘探效益的提升,都直接建立在地震数据品质的提高上面。当前,地震数据采集理论和技术的进展主要体现在以下两个方面:一是数据采集理论从 Shannon 规则采样发展到压缩感知随机采样;二是“两宽一高”地震数据采集成为了导向性的数据采集技术。

2.1 由 Shannon 规则采样到压缩感知随机采样

从数据采集理论角度看,Shannon 采样定理回答了如何进行规则离散采样才能完整地恢复成连续数据。众所周知,实际采样率小于用 Nyquist 频率计算出的理论无假频采样率,就可以由离散数据完全恢复

出连续数据。但是,这样的采样方式可能会采集到大量的冗余数据。

压缩感知采样理论实质上也是建立了一套由随机离散采样数据恢复成连续数据的理论。压缩感知采样理论同样要回答两个问题^[2]:一是如何进行随机采样;二是如何将随机采样数据恢复成连续数据。随机采样原则上主要关注炮点和检波点如何进行随机布设才能使如此采样的离散数据体以更高的精度恢复成规则无假频数据体。但是,空间随机采样数据恢复成规则无假频数据体与数据(波场)的空间结构有关,而勘探地震数据本质上是高维空间数据,这与 Shannon 采样仅仅关注一维数据是非常不同的。高维地震波场的空间结构又取决于地下地质结构,平缓层状地层中的地震波场要比复杂断块区的地震波场简单很多。而波场的空间结构越简单,空间随机采样数据恢复成规则无假频数据体时越容易,对应地,空间随机采样时,采样间隔可以越稀疏。亦即随机采样与地下地质结构的复杂程度相关,这与压缩感知理论要求信号有稀疏特征完全一致。但是,目前的压缩感知采样还没有涉及如此复杂的问题,还没有将随机采样方式的设计与地下介质复杂度(以及相应的波场复杂度)关联。

另外,“两宽一高”地震数据采集要求的激发炮数非常多,为了提高效率,需要若干炮同时激发,这就导致这些炮激发的波场混叠在一起被接收到。为了使混叠数据的分解更容易,若干炮激发时,起震时间必须是随机的(这与空间随机类似,都引入同相轴上反(绕)射波到达时的随机变化)。随机的起震时间将伪解码后的波场变成连续同相轴上叠加随机噪声,压制随机噪声即可达到数据分解的目的。本质上,这也是压缩感知理论下随机采样要解决的问题。因此,同时源激发高效采集也是压缩感知随机采样技术的一部分。

地震波成像本质上要求复杂的地下地质目标得到均匀且有效的照明。地下介质水平层状展布时,地表炮检点的规则排放等价于地下目标体照明是均匀的。而地下地质体构造复杂时,地表炮检点的离散规则排放,不一定带来目标地质体的均匀照明;炮检点的空间随机放置,可能以更大的概率带来对地下目标体的均匀照明。这是地下复杂介质分布情形下,随机炮检点分布时地震波照明的特点。很显然这是值得充分利用的。但是,这对空间随机采样的观测系统设计和野外施工提出了更高的要求,也对震源和检波器提出了更高的要求,即它们必须是独立且轻便的^[3]。

在当前勘探目标越来越复杂、地表条件(由于工

农业生产的进步)越来越复杂、低油价成为常态的情况下,同等投资获取数据情况下空间随机采样可能以更少的炮检点带来更高的成像质量。另一方面,空间随机采样和时间上震源随机激发混叠采样具有同样的理论基础,二者可以合并研究。在“两宽一高”地震数据采集逐渐普及的情况下,研究空间随机采样方法技术非常有意义。

但是,应该强调的是:压缩感知随机采样的目的并不是为了用比较少的炮点和检波点(从而降低成本)进行稀疏采样,恰恰相反,其目标是以可以接受的成本实现更高要求的“两宽一高”采样。复杂介质情形下,地面上规则的炮检展布观测系统对目标地质体照明的均匀程度,极大概率不如地面上随机炮检展布观测系统对目标地质体照明的均匀程度。依据压缩感知理论设计出的随机观测方式,可以插值出更多的炮道集,更进一步地提高采样密度。随机观测系统设计和地震数据插值及地震数据规则化都与地下介质的复杂程度有关(复杂近地表引起的道间时差也严重影响地震数据插值及地震数据规则化!),也与噪声情况有关,而二者都是事先未知的,这直接导致了压缩感知空间随机采样方式在实际应用中的小心谨慎,甚至止步不前。

2.2 “两宽一高”地震数据采集的实现方式

“两宽一高”地震数据采集技术代表当前和今后较长时间内地震数据采集的技术方向,这是毋庸置疑的。但是,如何高效并廉价地采集到宽方位、高密度、宽频带、高信噪比的地震数据依然任重道远。

解决问题的基本方式是:①增加单炮的带道能力,从而扩大单炮观测的方位角(更多的 Crossline 测线数以及更小的线间距)和偏移距(更大的 Inline 测线长度),并保证检波点的高密度(更小的道间距);②在保持上述单炮道集观测特点的基础上增加炮点数,尽可能地使炮线距和炮点距相等,并与检波线和检波点保持几何对称性;③巨量的炮集观测使采集效率成了巨大的障碍,需要利用同时源(或混叠源)的观测方式;④更进一步的观测方式发展方向应该是在考虑宽方位、高密度采集的基础上,巨量的、独立的检波器和震源,在压缩感知理论下,独立地同时激发和接收。

因此,开发自主移动的、宽带响应的、有自动、无线传输功能的单点检波器(譬如陆上和海上节点检波器)和可灵活移动并可大量布置的宽带震源是实现高密度、宽方位、宽频带(尤其是低频端)数据高效采集的硬件技术发展方向。目前震源、检波器和相应的(自动)布设技术都是制约“两宽一高”地震数据采集技术真正实现的瓶颈。国际上大型石油公司和地球

物理服务公司都在自动化与智能化的地震数据采集技术上,尤其在海上与陆上独立节点检波器技术和自主移动宽带震源技术研究方面,投入了大量的资金和人力^[4-6]。

2.3 陆上地震勘探中“两宽一高”地震数据采集技术

目前为止,公认的陆上地震数据采集技术重点可以总结为侧重低频的宽带(譬如 1~150 Hz)震源、宽带响应的单检(陆上节点检波器)、高密度、宽(全)方位。具体如下:炮检点对称的宽方位高密度采集方式;可无假频采集到与地表相关的波现象及环境噪声的采样间隔;能激发低频的宽带(可控)震源;可对低频有效响应的宽带检波器(加速度检波器有抑制低频的作用)是陆上地震数据采集技术的关键。另外,高效的“两宽一高”数据采集施工方案及配套保障技术也非常受关注;自动化与智能化地震数据采集技术在当前高速无线通信技术、人工智能技术和无人运载设备的快速发展促进下有显著的进步。

2018年1月, *First Break* 推出了1期陆上地震勘探技术专辑,将陆上地震勘探中的数据采集技术基本上定位于陆上节点检波器和侧重低频的震源技术在单点、高密度和宽方位地震数据采集方面的应用^[7]。无论是盆地内部、山前带和山地勘探,精细的油藏定位、描述与刻画的需求,都需要“两宽一高”的地震数据采集观测系统。小节点检波器(Nimble Node)为在复杂地表区实现单点高密度、宽方位采集提供了一定的硬件基础^[8-9]。据此,可以清楚地看出今后陆上油气地震勘探中地震数据采集技术的发展方向。

2.4 海上地震勘探中“两宽一高”地震数据采集技术

从精细储层描述角度看,对海上地震数据采集的要求与陆上是一样的,都需要“两宽一高”的地震数据采集。但是,由于海水层的存在,陆上和海上地震数据采集技术发展的差异性较为明显。首先,海上拖缆系统实现宽方位采集更为困难,真正的宽方位采集需要 OBS(OBC 和 OBN)采集技术^[10-11]。沉浸缆系统可以实现宽方位采集^[12]。第二,海上高密度采集的实现方式需要具体分析。针对 OBN 系统,海底节点(node)的布设成本很高,点距和线距都做不到很小,200 m×400 m 已经较密。针对 OBC 系统,12.5 m×200.0 m 比较常规。海上高密度采集需要用炮端激发的高密度来弥补检波端密度的不足。拖缆系统可以做到 6.25 m×75.00 m,但对应的激发点做不到规则而密集。所谓的 Coiling 拖缆观测系统可以实现高密度观测,而且自动化程度很高,但炮检点空间位置都是随机的,对野外施工技术和后续的处理技术要求很

高,目前并没有得到广泛应用。第三,海上鬼波压制需要特殊的观测系统,因为仅靠常规的平缆观测数据压制鬼波的效果不够彻底;斜缆、立体缆和立体震源、多分量观测等海上采集技术是专为压制鬼波而设计的。第四,正是海水层的存在使得海上实现自动化与智能化的数据采集更容易,因为独立的震源和独立的节点检波器可以自动地、智能地移动到既定的激发与接收位置。第五,为满足海上生态保护的要求,气枪震源需要逐步让位于海上可控震源。最近几年,海上可控震源已经接近于商用化应用的水平^[13-14]。海上可控震源的研发成功为真正地实现按客户需求定制震源子波的频谱,从而实现高分辨率和高保真成像奠定了坚实基础^[15]。由于陆上地表介质的复杂性,目前陆上可控震源实现客户定制子波频谱尚存难度。

3 “两宽一高”数据对提高成像处理质量的贡献

“两宽一高”地震数据可有效提高地震波成像的质量。可以说,“两宽一高”地震勘探技术是最近十几年地震勘探最有价值的技术进步,大幅度提升了油气地震勘探的效益。但是,宽方位、宽频带和高密度地震数据对地震波成像质量提高的贡献是不同的。

宽方位地震数据最重要的是改善了复杂介质情况下的地震波照明,提高对目标地质体的方位及(入射)角度照明的范围和均匀程度。尤其是它与高密度采集结合,可以显著提高中、深层速度(也包括各向异性参数和 Q 值)估计与建模的精度,提高复杂构造(尤其是盐下构造和陡构造)成像的质量,同时提高成像分辨率和保真度。另外,可以提供方位角度道集,用于 AVAz 分析和 VVAz 分析。这是在类似墨西哥湾复杂盐丘广泛发育探区必须开展宽方位和长偏移距地震数据采集的主要原因^[16-18]。

高密度地震数据对地震波成像处理的贡献可以总结为:①对噪声进行完整的采集,进而实现无假频去噪,保持了信号高频谱和低频谱的正确性,间接地提高了成像分辨率;②对随机噪声而言,增加覆盖次数 N ,根据统计学的方差定律,可按 \sqrt{N} 的比例提高叠加结果的信噪比;③提高成像网格密度,可降低成像假频;④增加地下成像点的照明密度,提高速度层析反演的精度,进而提高反(散)射波的同相叠加性,间接地提高成像分辨率;⑤炮密度的大幅度提高增加了照明能量及照明均匀度,有助于提高信噪比和提高成像质量;⑥有助于提高小尺度异常体的散射波无假频采样,进而提高小尺度异常体的成像质量;⑦高密

度采集特别有利于提高近地表速度模型建立的精度。相对于地震速度较高的中深层,低速的近地表速度模型误差对高精度地震波成像产生了更严重的影响,精确的近地表速度能显著地提高成像分辨率和保真度。

单点高密度采集是陆上地震勘探中推崇的采集方式。本质上讲,它是“两宽一高”地震数据采集的另一种称谓。目前,陆上地震勘探取消检波器组合已经成为共识。组合采集的缺点:①无论组合距多小,组合检波总会引起信号高频成分的损失,而且完全无法弥补;②组合检波并不能总是有效地压制相干噪声,而在高密度/高覆盖情形下,并不需要组合采样的方式压制随机噪声。单点高密度采集的优点:①保持原始信号的频带特征,有利于后续的宽带地震数据成像处理,尤其是高频端有效信号的保持;②去噪放在处理阶段,增加了去噪的灵活性,不仅仅是靠硬性叠加一种方式,可以保真地压制相干噪声和随机噪声,有利于宽带地震数据成像处理,有利于后续的高精度储层描述。所谓的单点高密度采集的缺点:增加了数据的存储量,成像处理的工作量也相应增加。

宽频带数据对地震波成像处理的主要贡献:①低频长偏移距数据可以进行透射波波动理论层析(当前的 FWI 本质上就是实现了波动理论的透射波层析成像,反射波的 FWI 很难收敛!),从而提供更准确的背景速度以及各向异性参数和 Q 值,以改善叠前成像的同相叠加性;②展宽地震数据的低频端,可以有效地压制成像子波的旁瓣能量水平,而展宽地震数据的高频端,可以有效地压缩主瓣宽度,5 个以上倍频程(譬如 2~80 Hz)的成像结果能极大地提高纵、横向分辨率;③数据中低频成分的存在能有效地提高波阻抗估计的精度,改善储层解释的可靠性。

4 “两宽一高”地震勘探中的地震分辨率

高分辨率地震波成像是油气地震勘探的核心,也是进行精细油藏描述的基础。地震分辨率的概念在勘探地震中一直起着引领技术向前发展的作用。“两宽一高”地震勘探时代应该用什么样的分辨率概念促进地震数据采集技术和地震波成像技术的发展?

瑞利(Rayleigh)准则指出:一个反射波的分辨率的极限是 $1/4$ 波长”。李庆忠^[19]认为:“不同的频率成分有不同的用处,缺了哪一部分都不成;要查明地下 5~30 m 厚度的砂层,最重要的频段是 10~160 Hz,对于查明大套灰岩顶部的台阶状波阻抗的情况,低频成分十分重要;分辨率与频宽成正比这句话虽然不错,但是并不能光看频宽数值愈大愈好还要

注意不要丢掉低频成分。我以后还要指出：那种丢掉低频成分的、表面上看来主频较高的分辨率是假分辨率。”瑞利(Rayleigh)准则在零相位 Ricker 子波条件下给出层状介质分辨率的描述。李庆忠的观点无疑是正确的，但勘探地震中的低频最好是低至 1 Hz。10~160 Hz 频段子波(仅有 4 个倍频程!)具有所谓的高分辨率的判断是不对的，一定没有 2~80 Hz 频段子波(具有 5 个以上的倍频程!)的分辨率高。另一方面，李庆忠没有将地震分辨率与“两宽一高”的观测方式联系在一起。

很显然，简单地利用地震子波主频(包括频宽)及其对应的波长定义分辨率，已经远远无法满足当前复杂地表、复杂构造和复杂储层情况下地震勘探的实际需求。

本质上，地震分辨率的概念是由地震波反演成像

理论给出的，是将地震数据观测、地震波正演和反演成像方法紧密结合得到的。另外地震波偏移成像的分辨率与地震波反演成像的分辨率也是有区别的。需要指出的是，勘探地震中子波的概念贯穿始终，它与分辨率有密切的关系，包括震源激发的子波、检波器接收到的地震子波、偏移成像及反演成像后的成像域中的空间子波。

最重要的是，勘探地震中所关心的分辨率主要是地震成像后空间子波的分辨率，它取决于背景偏移速度精度、观测孔径、接收子波的频宽、成像中使用的正演算子和噪声水平。

本文将“两宽一高”地震勘探(当然也包括一般地震勘探)的地震分辨率归结为由空间子波的频宽(倍频程)决定，更严格地讲，由空间子波完整的频谱决定。由图 1 可以看出空间子波的频谱是如何影响分

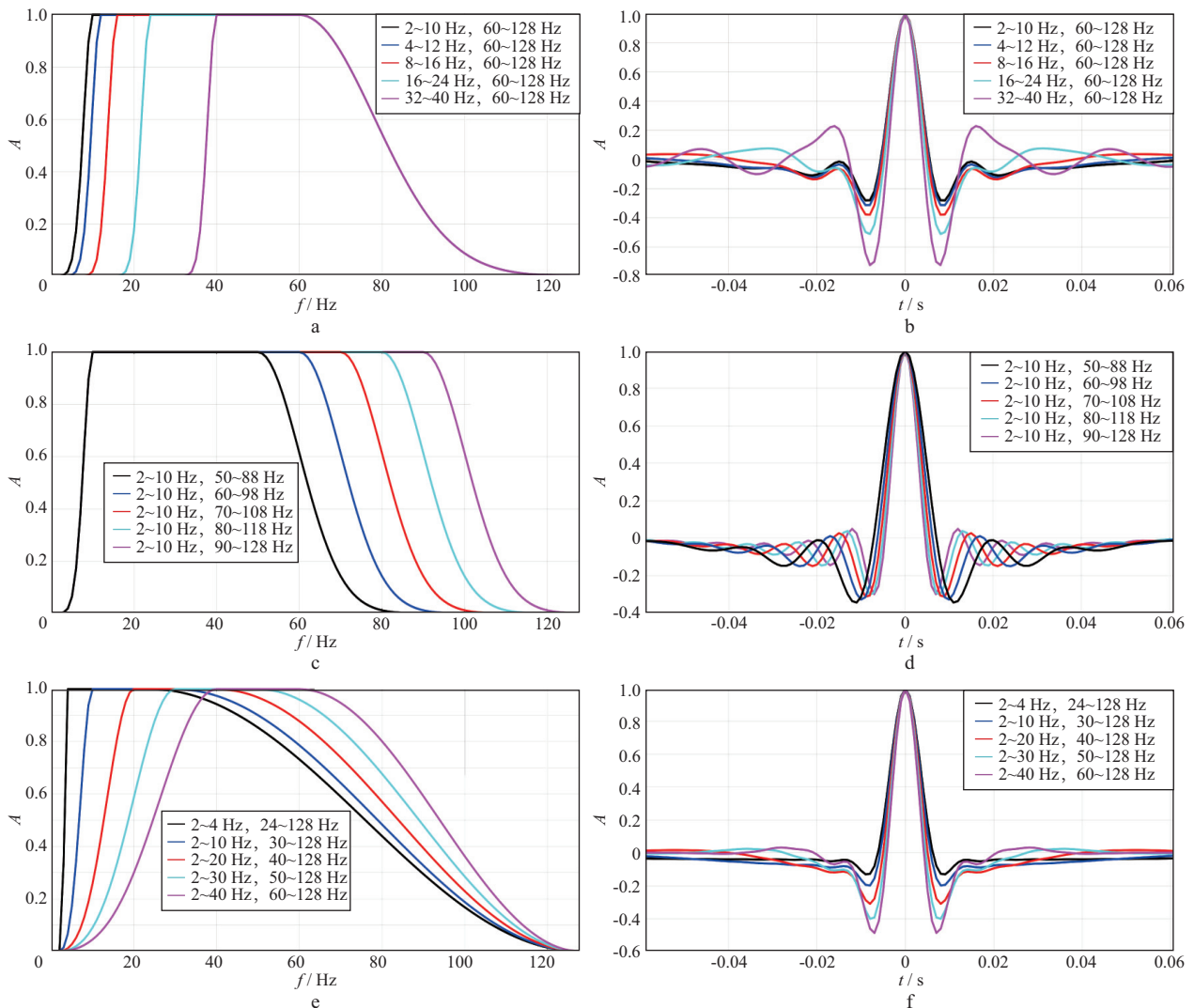


图 1 空间子波频谱对地震分辨率的影响

a 固定空间子波高频成分仅增加低频成分的子波频谱；b 固定空间子波高频成分仅增加低频成分的空间子波；c 固定空间子波低频成分仅增加高频成分的子波频谱；d 固定空间子波低频成分仅增加高频成分的空间子波；e 频宽相同但优势频段不同的子波频谱；f 频宽相同但优势频段不同的空间子波

分辨率的。图 1a 为固定空间子波高频成分仅增加低频成分时子波的频谱;图 1b 为对应的子波形态。图 1c 和图 1d 显示出当固定空间子波低频成分且不断增加高频成分时,子波主瓣变窄,主瓣与主旁瓣峰值比也在上升(尽管上升不显著),具有 2~128 Hz(6 个倍频程)频宽的地震子波具有很高的分辨能力。图 1e 和图 1f 显示出子波频带宽度固定但优势频段不同时,子波的分辨率也不同,优势频段在低中频段时,子波的分辨率更高。显然,我们期望油气地震勘探中无论是激发、接收和成像后的子波都具有较大的频宽,如 5 个以上的倍频程。随着低频成分的增加,子波的主瓣宽度变化不大,但主瓣与主旁瓣峰值比显著上升,主旁瓣幅值明显下降,次旁瓣震荡水平明显减弱,这说明增加低频成分能通过压低子波主旁瓣和次旁瓣水平实质性地提升分辨率。李庆忠^[19]也特别强调了优势低频的重要性。这就是勘探地震中需要用户定制激发地震子波频谱的根本原因,尽管在当前的勘探地震数据采集过程中还无法做到用户定制激发子波的频谱,但这应是未来的发展方向。

根据上述分析结果可知,地震成像后空间子波的分辨率决定了油气地震勘探的分辨率,而它取决于背景偏移速度精度、观测孔径、接收子波的频宽、成像中使用的正演算子和噪声水平。本文认为正是基于对成像后的宽带空间子波分辨率的认识才催生了“两宽一高”地震勘探。

5 “两宽一高”成像处理中的关键问题分析

地震勘探的目标地质体越来越小、越来越复杂、越来越隐蔽,不仅要求地震成像给出精确的地质结构成像结果,更希望对储层描述与刻画的精度也得到有效的提高。针对当前单点、高密度、宽方位、宽频带的地震数据,成像处理方法分为如下 4 个部分应该是合理的^[20-24]。

1) 与地表相关的波现象(噪声)与环境噪声的压制。主要是对与地表相关的波现象(相干噪声)的压制,因为这部分波现象是地下反(散)射体成像的主要干扰波。另外,地表条件的空间变化引起的炮与炮及道与道之间的反射子波在振幅、相位和频带的变化(或不一致性)必须得到有效的消除。

2) 高维地震数据规则化。宽方位地震数据的偏移距和方位角分布更不均匀,尤其是近偏移距时更是如此。高维地震数据规则化在保真成像中有重要意义,仅仅重视构造成像还凸显不出其真正的价值。

3) (各向异性)速度建模与成像。折射波与 Diving Wave 在大偏移距和宽方位情况下是十分明显的波现象,它们主要体现为初至波与早至波(值得注意的是深层折射波和 Diving Wave 在超长偏移距勘探中也可能与反射波混叠在一起)。利用这两种波进行层析成像获取近地表速度是非常重要的环节,能有效提高速度建模和成像的精度。全方位角道集反射波层析成像会是当前及今后很长一段时间宽方位地震数据(各向异性)速度建模的核心工具。TTI 介质情形下能产生方位角度成像道集且针对 OVT 数据或共角度(或共射线参数)数据的 Kirchhoff 积分叠前深度偏移是宽方位高密度数据成像的首选成像方法,主要原因是其具有很高的计算效率。

4) 成像道集的后处理。叠前成像的本质是同相叠加,基本实现方法是将数据域中的反射(散射或绕射)子波扩散到成像空间的等时面上。地表不一致性引起的炮与炮、道与道之间的子波变化会影响成像的保幅性,其中包括剩余静校正量、子波振幅变化、子波相位(非零相位)变化等。地震道的空间非规则性影响成像结果的振幅。数据中随机噪声的存在会影响成像结果的保真性,相干噪声的存在会产生假的成像结果。更重要的是偏移速度不准确引起各炮检对的反射子波不能排齐。不完善的成像方法也会产生不正确的成像结果。上述各种因素使得成像道集的去噪、剩余时差处理、子波相位处理等显得非常必要。

下面分别阐述“两宽一高”地震数据成像处理环节中的关键问题。

宽方位地震数据成像处理中的关键问题可以总结为:

1) 宽方位及长偏移距观测数据,必然引入 VTI 地震各向异性现象。因此,成像处理中必须至少考虑 VTI 介质情况下的各向异性速度建模及相应的偏移成像方法。

2) 宽方位数据采集,由于地下介质参数横向变化大,导致照明更不均匀(与窄方位观测比),因此,照明不均匀性需要在成像过程中校正。

3) 宽方位数据采集往往导致数据的空间采样不规则。数据规则化处理是必须的,在 OVT 数据成像处理技术中,这是核心的处理步骤。

4) 宽方位数据能很好地改善速度(及各向异性参数)的估计精度。因此,全方位或宽方位角度道集层析成像是必须具备的建模技术。

5) 偏移成像技术中方位角度道集的输出应该是必须的,否则 VVAz 和 AVAz 分析方法无法进行。因此,方位角度成像道集的输出技术是必备的。

6) 各种成像道集的后处理技术也是必须具备的。

高密度地震数据成像处理中的关键问题可以总结为:

1) 反演成像阶段,噪声对 FWI 及 LS_RTM 这类迭代反演成像方法有重要影响。这也是反演成像时代为什么业界对噪声特别关注的根本原因。无假频去除面波,保持信号低频分量的有效性,相当于拓展了低频成分。地表散射波在稀疏采样时表现为不相干噪声(但它们不是随机噪声),高密度采样有利于无假频地采集到此类干扰波,进而对其进行有效压制。高密度采样提高了随机噪声的统计可预测性,能更好地压制随机噪声。无论相干噪声还是随机噪声,都应在高维数据空间中进行压制。

2) 高密度采集特别有利于近地表小尺度速度异常体的估计,利用初至到达时及振幅进行近地表速度及 Q 值估计是重要的处理环节。在复杂地表探区,初至波(包括早至波)的信噪比远高于反射波的信噪比,充分利用高密度采集的地震数据开展精确的近地表速度建模非常有助于提高成像精度。这是高密度地震数据处理中特别值得关注的问题。

3) 高密度采样提高了信号(包括相干噪声)的可预测性,非常有利于提高高维地震数据插值和数据规则化的效果,并做到了更彻底的去噪。实质上也提高了随机噪声的统计可预测性,更好地压制了随机噪声。

4) 高密度采样有利于提高基于统计原则的地表一致处理的精度。

总之,针对高密度采集数据进行合适的地震数据处理可以显著提高地震波成像处理的分辨率,这主要是通过提高近地表速度和 Q 值建模的精度、通过消除噪声对有效信号的低频成分和高频成分的伤害实现的。噪声当然也损害优势频段的信号,高密度采样同样可以有效地降低对优势频段信号的伤害,通过高密度采样数据更彻底地去噪可显著提高信号低频成分和高频成分在去噪后的保真度。提高近地表速度建模精度能更显著地改善不同炮检对接收到的反(散)射子波的同相叠加性;近地表较低的 Q 值模型的准确建立能有效补偿高频成分的衰减。这些均是高密度采样显著改善成像结果分辨率的主要原因。高密度地震数据处理带来的问题是巨量的数据体给成像处理各环节带来了计算上的压力。

宽带地震数据成像处理的关键问题可以总结为:

1) 宽带地震勘探首先是各环节(指采集和成像处理环节)中频率成分向低频端的扩展,譬如从 8 Hz

下推到 1 Hz 就展宽了 3 个倍频程,而从 60 Hz 的高截频再提高 1 个倍频程,也难以做到!

2) 从数据采集的角度展宽频带(物理方法展宽频带)是基本的要求,而不是一开始就专注于用处理手段展宽频带。数学方法展宽频带提高的基本是视觉分辨率,无助于进行精确的油藏描述。即便是进行 Q 值补偿,主要也是展宽高频端,且不能保证展宽的频带有物理意义。

3) 展宽信号的高频端可以压缩子波的主瓣宽度,展宽信号的低频端可以降低子波的旁瓣能量水平。只有宽带的地震子波(譬如达到 5 个以上的倍频程)才有较高的分辨率。地震子波的低频成分对于相对波阻抗反演有切实的贡献。

4) 宽带地震勘探效果的体现是成像剖面上空间子波的高分辨率(即宽频带)。期望成像后的空间子波有 5 个以上的倍频程。

5) 对反射系数成像而言,数据中反(散)射子波的宽频带似乎对于成像域空间子波的宽频带贡献最大。但是,这种观点可能带来严重的偏差! 成像剖面上空间子波的宽频带首先是由同相叠加实现的,(各向异性)偏移速度场的精度对高分辨率成像的影响最大。

6) 海上宽带地震数据成像处理的 3 个核心环节是:压制鬼波展宽数据中地震子波的频带; Q 值估计及吸收衰减补偿;精确的各向异性速度建模以保证同相叠加。

7) 陆上宽带地震数据成像处理的关键环节没有统一的认识,本文认为应该包括地表一致子波形态校正(可以统一成零相位子波)、精确的近地表建模、精确的近地表 Q 值估计和精确的中深层速度估计。数学拓频方法只能作为一种图像处理手段,辅助解释人员识别小或薄的地质体,而且对它的不可靠性要保持足够的警觉。

6 “两宽一高”地震勘探中的地震地质解释

油气地震勘探的最终目标是定位油气藏和(半定量)描述油气藏。基于叠前地震数据的地震波偏移成像与反演成像为油气藏的定位、描述与刻画提供了重要信息。本文将地震波反演成像定位为:在不完全数据下的地下介质弹性参数(主要是速度、波阻抗和反射系数)的估计问题。油气藏描述与刻画定位成:在信息(高度)不完全情况下对油气藏的定性(或半定量)描述问题。

油气藏描述与刻画的核心工作主要包括:①油气藏几何形态的刻画;②油气藏岩性参数与储层参数的估计;③油气藏流体参数的估计。“两宽一高”地震波叠前地震数据采集和成像处理为油藏描述提供的基础数据包括:①高分辨和高保真的成像道集以及相应的叠加成像剖面;②高精度背景速度场。基于前者,地震地质解释主要包括:①AVA及AVAz分析与反演;②叠前地震属性参数的提取;③基于地震成像叠加剖面的进一步图像增强处理,开展沉积、构造与断层系统等的描述;④开展叠后属性参数的提取;⑤编制构造图。基于后者,主要开展宽带波阻抗反演。

地震地质解释的基本理念:①油气地震勘探中,认识地下岩石介质性质的主要手段是利用人工激发的地震波;②地震波在地下介质中传播时,透射、反射或绕射等各种波场携带了关于地下介质的几何性质和岩石性质的信息;③利用单炮道集、CMP道集、共偏移距道集等可以定性地了解到地下介质的部分变化信息,但它们仅仅是地表观测的叠前数据,不是地下介质参数的变化信息;④叠前时间/深度偏移成像和叠前地震数据反演成像是将叠前数据投影成地下介质几何参数与弹性参数的方法技术,这些技术将地下岩石介质变化的信息提取出来,展现在解释人员面前;⑤钻井可以更为直接地得到岩石物性的信息,但是这样做的代价太高,而且只能得到井孔处局部点上的信息,适用于约束反演成像或评价反演成像结果的可靠性;⑥基于反射界面的几何(构造)解释和基于反射子波属性的解释目前依然是地震地质解释中最为核心的两项工作;⑦基于1D波阻抗反演剖面、AVA叠前弹性参数反演剖面进行解释,缺乏对反演结果可靠性的评价,属于定性解释。

本文对地震地质解释的基本观点:①基于地震波到达时层析反演地下介质背景(各向异性)速度,并基于该速度场进行叠前深度偏移成像,一般情况下这样的成像结果具有较高的可靠性,是地震地质解释最基本的信息;②1D波阻抗反演、AVA叠前参数反演以及经典的FWI反演,这些基于地震波振幅的反演,目前都严重缺乏对反演结果准确性/可靠性的评价。将这些结果用于地震地质解释时,要特别注意对解释结果可靠性的评价^[25]。

本文关于深度域地震地质解释的观点总结如下。

6.1 构造解释

基于成像叠加剖面的构造、断层等的解释,甚至包括更细致的地震地层学解释应直接在叠前深度偏移后的剖面上进行,并直接在解释结果上得出构造

图。深度偏移成像提供了基本正确的、定量的反射界面定位结果。将深度域成像结果转回时间域,并基于测井速度对反射层位进行深度标定可以得到更可靠的构造图,而基于深度偏移结果得到的构造图误差大的观点是没有理论依据的。在目前勘探目标区域构造越来越复杂的情况下,基于深度偏移结果直接得到构造图是唯一正确的选择。若基于叠前深度偏移成像结果进行深度域解释得到的构造图不合理,说明所建立的(各向异性)速度模型的精度不够,需要继续迭代更新。

将测井速度与叠前时间偏移结果结合,采用射线深度偏移进一步调整速度和构造并得到构造图的方法,只适用于横向速度变化较小的层状介质情况,在横向速度变化剧烈和构造变化较大的情况下,这种方法不可能得到精细的构造图,更不能进行正确的油藏体系评价。

6.2 子波属性

正是时间域成像子波与深度域成像子波之间的关系不清楚造成解释人员固守时间域解释。它们之间的关系由偏移速度决定,深度域成像子波是时间域成像子波的挤压或拉伸结果。本文认为在深度域成像子波与时间域成像子波上的属性提取结果存在一定的差异,但是二者振幅能量属性在平面展布上应该基本一致,频率与相位属性在平面展布上会有一些差异,但没有必要将深度域成像子波映射回时间域成像子波进行属性提取。事实上,本文认为地震地质解释中只有振幅能量属性比较可靠。关键原因是深度域无法进行一维波阻抗反演和合成地震记录的对比阻止了解释人员开展深度域解释。本文认为复杂构造情况下,因为基于时间域成像结果的一维波阻抗反演没有任何理论基础,所以一维波阻抗反演结果的可靠性无从谈起。

6.3 AVA分析

水平层状介质或横向缓变介质情况下,利用AVA分析进行储层描述和含油气性预测是地震地质解释中的一项标志性工作。基于角度成像道集的叠前弹性参数反演有大量的文献报道。但是,该项技术在储层描述中真正的贡献到目前为止依然深受质疑^[22]。在当前复杂构造及复杂储层勘探阶段,Zeopritz方程的理论假设的有效性、各种复杂因素(包括数据不规则、噪声、偏移速度、成像方法等)影响下角度成像道集完全无法做到振幅保真使得AVA分析难以有效进行,基于角度成像道集的叠前弹性参数反演的可靠性更是难以保证。

对于“两宽一高”勘探地震时代地震地质解释进

一步的技术发展方向,本文以设问的方式表达看法:

- ①油藏几何形态的刻画下一步尚需要发展什么新技术?
- ②地震相识别和岩相识别需要发展什么新技术?
- ③基于叠前成像道集和基于成像叠加剖面的属性提取需要发展什么新技术?
- ④属性聚类的新方法应该是什么?
- ⑤地震属性与储层含油气性关联性分析需要什么新技术?
- ⑥井震信息融合需要发展什么新技术?
- ⑦AVA反演是否要融入FWI中?合理的方法技术是什么?
- ⑧“两宽一高”数据下直接估计宽带波阻抗的技术应该是什么?

7 结论与讨论

油气地震勘探面对的地下介质情况(包括地表条件和油藏情况的日益复杂化迫切要求地震数据采集技术、成像处理技术、地震地质解释技术和油藏评价技术的进步。当前,“两宽一高”地震勘探技术应该是针对上述需求发展起来的一种标志性的技术体系。

“两宽一高”地震勘探首先必须是采集技术的发展。当前,“两宽一高”地震数据采集技术的发展较为迅速,各种形式的观测系统、各种震源及激发形式、各种检波器及自动布设技术等层出不穷。但是,真正廉价且高效地实现“两宽一高”的地震数据采集还存在巨大障碍,首先是与震源和检波器相关的硬件条件不满足需求,自动化与智能化地实现“两宽一高”的数据采集即便在海上也存在很大的困难。陆上的“两宽一高”地震数据采集主要是针对中深层目标地质体,问题是精确的油气地震勘探必须首先弄清楚近地表岩石介质的结构和参数,否则不可能做到针对目标地质体的真正高分辨与高精度成像。这与海上油气勘探有较大差异。兼顾浅层的高密度地震数据采集目前还很难做到。陆上DAS采集系统有这样的潜力,但何时能实用化还很难预测。

从海量的“两宽一高”数据中提取与精确描述储层有关信息的技术发展严重滞后。无论是地震波反演成像或是地震地质解释与储层描述,都远没有发展到将“两宽一高”数据中蕴含的有意义的信息提取出来,指导油藏的有效开发。以“FWI+LS_RTM”为标志的反演成像方法技术还不能大规模用于生产实际,以AVA/AVAz叠前弹性参数反演为代表的储层(半定量)描述方法由于其高度的不可靠性深受质疑。叠前地震数据的反演成像中对井孔数据(包括各种地质信息)的有效利用远未达到有机融合的程度。

“两宽一高”地震数据,包括来自井孔的数据,是

一个巨量的数据体,但对于复杂的油藏描述问题而言,并不是一个完备的数据体。地震波反演成像问题及油藏描述问题就是一个信息不完全情形下的“最佳”判断问题。因此,本文认为:在“两宽一高”油气地震勘探的旗帜下,“两宽一高”地震数据采集技术、融合地质和测钻井信息的地震波反演成像技术和(半)定量的油藏描述技术是今后油气工业界长期关注并不断完善的关键技术。

致谢:感谢中石油勘探开发研究院及西北分院、中海油研究院和湛江分公司、中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院和胜利油田分公司对波现象与智能反演成像研究组(WPI)研究工作的资助与支持。

参 考 文 献

- [1] OURABAH A, KEGGIN J, BROOKS C, et al. Seismic Acquisition, what really matters? [J]. Expanded Abstracts of 85th Annual Internat SEG Mtg, 2015: 6-11
- [2] 王华忠, 冯波, 王雄文, 等. 压缩感知及其在地震勘探中的应用[J]. 石油物探, 2016, 55(4): 467-474
WANG H Z, FENG B, WANG X W, et al. Compressed sensing and its application in seismic exploration [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(4): 467-474
- [3] MILLIS K. Compressive Seismic imaging: land acquisition case study and operational considerations [J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018: 112-115
- [4] LANE J W, STOLL J B. Introduction to this special section: Unmanned autonomous vehicles [J]. The Leading Edge, 2017, 36(7): 550-551
- [5] MOLDOVEANU N, CAPRIOLI P, KJELLESVIG B A, et al. Marine seismic acquisition with autonomous marine vehicles towing 3D sensor arrays [J]. The Leading Edge, 2017, 36(7): 558-565
- [6] MORSDORF F, ECK C, ZGRAGGEN C, et al. UAV-based LiDAR acquisition for the derivation of high-resolution forest and ground information [J]. The Leading Edge, 2017, 36(7): 566-570
- [7] DEAN T, TULETT J, BARNWELL R. Nodal land seismic acquisition: The next generation [J]. First Break, 2018, 36(1): 47-52
- [8] BROOKS C, OURABAH A, CROSBY A, et al. 3D field trial using a new nimble node-West Siberia, Russia [J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018: 6-10
- [9] MANNING T, BROOKS C, OURABAH A, et al. The case for a nimble node, towards a new land seismic receiver system with unlimited channels [J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018: 21-25
- [10] STONE J, WOLFARTH S, PRASTOWO H, et al. Tangguh ISS® ocean bottom node program: A step

- change in data density, cost efficiency, and image quality[J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018; 146-150
- [11] NARANJO J C, PFISTER M, CARDINEZ S, et al. BP Phase II Trinidad; Efficient acquisition of a high trace density 3D ocean bottom sensor exploration survey[J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018; 141-145
- [12] BATHELLIER E, HAUMONTÉ L. The Midwater Stationary Cable (FreeCable), a totally flexible acquisition technology to tackle the subsurface imaging and reservoir characterization challenges[J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018; 66-70
- [13] POOL R, KANU C, BRENDERS A, et al. The Wolfpar® Field Trial; Design & execution of a low-frequency seismic survey in the Gulf of Mexico[J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018; 91-96
- [14] ROY D A, REKOS R, BRIDEAU C, et al. A marine vibrator to meet the joint industry project specification [J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018; 97-101
- [15] 王华忠, 郭颂, 周阳. “两宽一高”地震数据下的宽带波阻抗建模技术[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 85-87
WANG H Z, GUO S, ZHOU Y. Broadband acoustic impedance model building for broadband, wide-azimuth, and high-density seismic data [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 85-87
- [16] ZDRAVEVAO, YONG S L, MEDINA E, et al. Ultra-large-scale wide-azimuth acquisition and broadband imaging in the Campeche basin[J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018; 61-65
- [17] ZHOU Z Z, CVETKOVIC M, XU B, et al. Analysis of a broadband processing technology applicable to conventional streamer data[J]. First Break, 2012, 30(10): 77-82
- [18] MOUGENOT D. Marine, seabed, and land seismic equipment for broadband acquisition: a review[J]. Geophysical Prospecting, 2018, 66(5): 922-933
- [19] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 24
LI Q Z. The way to obtain a better resolution in seismic prospection [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 24
- [20] DUVAL G. How broadband can unlock the remaining hydrocarbon potential of the North Sea[J]. First Break, 2012, 30(10): 85-91
- [21] ZDRAVEVA O, HYDAL S, WOODWARD M. Tomography with geological constraints—An alternative solution for resolving of carbonates [J]. Expanded Abstracts of 75th Annual Internat EAGE Mtg, 2005; 4770-4774
- [22] ALEMAN A, HEIMBACH J, MEDINA E, et al. Broadband processing for Campeche Basin: Improved seismic resolution and attribute derivation [J]. Expanded Abstracts of 87th Annual Internat SEG Mtg, 2017; 4881-4886
- [23] RAY A K, CHOPRA S. Building more robust low-frequency models for seismic impedance inversion [J]. First Break, 2016, 34(5): 47-52
- [24] GRAY S H. Seismic imaging and inversion: What are we doing, how are we doing, and where are we going? [J]. Expanded Abstracts of 84th Annual Internat SEG Mtg, 2014; 4416-4420
- [25] MORADI S, TRAD D, INNANEN K A. Quantum computing in geophysics: Algorithms, computational costs and future applications [J]. Expanded Abstracts of 88th Annual Internat SEG Mtg, 2018; 4649-4653

(编辑: 朱 珠)