

地震地质一体化研究中的地震数据处理 质量监控方法综述

李大卫¹, 杨 锴^{1,2}, 杨顺军³

(1. 同济大学海洋与地球科学学院地球物理系, 上海 200092; 2. 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 3. 中国石油东方地球物理公司北疆勘探项目经理部, 新疆乌鲁木齐 830016)

摘要:针对当前勘探地球物理界正日益推广的地震地质研究一体化研究思路, 重点介绍了国内外工业界常用的 3 种地震数据质量监控体系, 并对其监控原理和实施过程进行了详细介绍。从基于 VSP 的井控地震处理质量监控, 到基于测井资料和岩石物理建模的质量监控, 再到基于一致性处理理念的叠前相对保持振幅、频率、相位和波形处理流程与质控体系, 逐个分析了 3 种质量监控体系的特点, 并对地震数据处理质量监控体系的未来发展目标给出了自己的观点和认识。

关键词: 地震地质研究一体化; 质量监控; 井控地震数据处理

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

随着地震数据处理解释一体化、地震地质综合研究一体化、从地震到油藏综合研究一体化的研究思路日益为人们所广泛接受, 基于三维叠前道集与三维成像数据体的精细地质解释与高精度反演已经成为工业界在储层描述与预测方面最重要的技术手段。为了确保解释与反演的精度与可靠性, 对前期的三维地震数据处理实施严格的质量监控, 一直是工业界高度关注的研究内容。在这方面, 国内外已经有不少研究成果发表^[1~5]: 20 世纪末, Schlumberger 公司提出了基于 VSP 资料的井控地震数据处理质量监控体系^①, 认为处理中的球面扩散因子、吸收衰减因子、反褶积算子以及叠加速度场与偏移速度场的建立, 都应该从 VSP 资料出发进行标定。Jason 公司作为国际知名的储层反演与建模公司, 认为基于测井资料的岩石物理建模并结合合成地震记录与 AVO 正演对地震数据叠前处理实施监控, 是保证反演质量与可信度最重要的一环。国内学者则认为地震数据处理中的一致性监控是保证沉积微相解释与叠后反演精度最重要的前提, 并提出了基于一致性原则、从叠前到叠后的一整套质量监控标准。从应用的角度来考察, 这些质量监控标准各有其出发点与必要性, 但是我们更关心这些不同的质量监控体系背后的理论依据是什么? 相互之间是否存在联系? 有无可能、或者说有无必要找到一种统一的、具有普遍性的地震数据处理质量监控体系? 本文对几种地震数据处理监控体系进行详细阐述, 并针对上述问题给出一些初步的认识。

1 几种地震数据处理监控体系介绍

1.1 基于垂直地震剖面(VSP)的井控地震数据处理

井控地震处理技术是近年来广受关注的一项新地震资料处理技术。所谓井控地震处理技术, 就是在地震资料处理的过程中, 最大程度地利用已有井的测井资料、VSP 资料, 将井点数据和地面地震数据进行一体化联合分析、处理, 最终提供高保真、高分辨率、高信噪比的“三高”地震数据, 为后期的勘探、开发方案提供可靠的依据。

井控地震资料处理最重要的环节是井匹配处理, 它贯穿于地震资料处理过程之中, 用来定量分析并优选地震参数, 如图 1 所示。井控地震处理技术在地震资料处理过程中的应用主要体现在:

1) 真振幅恢复。井控地震处理的方法从 VSP 资料和测井资料中分析求取球面扩散补偿因子、Q 补偿因子等^[5], 比常规方法更准确、更符合实际情况。

2) 地表一致性反褶积。地表一致性反褶积参数的常规测试主要是通过参数扫描的方法, 对比不同参数在单炮和叠加剖面上的效果。井控地震处理的方法提供了定量分析反褶积参数的手段, 根据不同参数偏移结果与井资料匹配的程度, 确定最优参数。

收稿日期: 2010-01-14; 改回日期: 2010-02-09。

第一作者简介: 李大卫(1986—), 男, 现在同济大学海洋与地球科学学院固体地球物理学专业攻读硕士学位。

① <http://www.westerngeco.com/>。

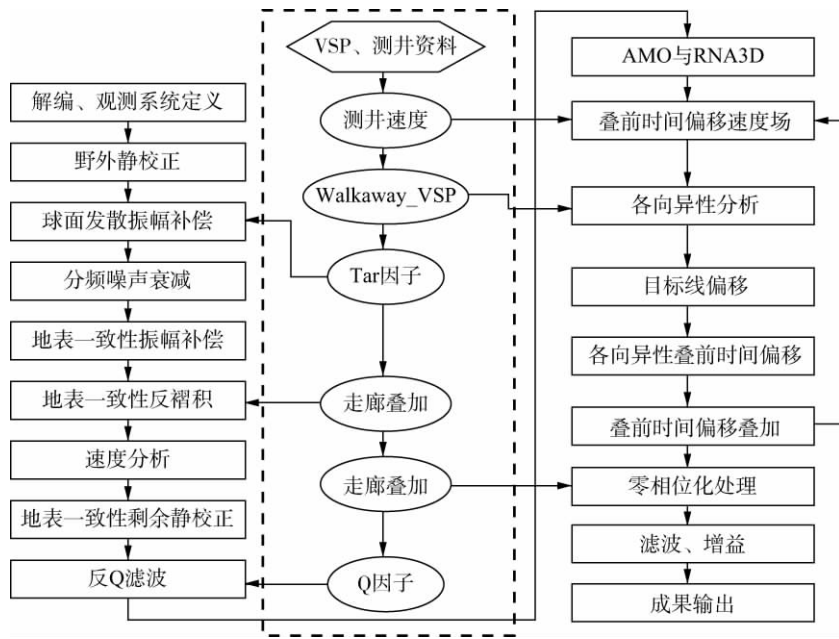


图 1 井控处理流程^①

3) 叠前时变 Q 因子分析。用不同分析频带所得出的 Q 值与井资料多谱比法求取的 Q 值互为校准, 并将应用不同 Q 补偿的偏移剖面与井资料进行匹配分析, 达到最佳匹配的即为最佳参数分析频带。

4) 各向异性参数提取。基于 Walkaway-VSP 的各向异性参数分析与提取方法已经是非常成熟的应用, 可以提取合理的各向异性参数。

5) 叠前偏移速度场的修正与约束。利用测井速度与零偏 VSP 速度还可以对偏移速度场进行有效的约束与系统校正, 使得偏移速度场与地下构造更好地闭合。如果将上述各向异性参数赋予偏移速度场, 将不仅能够获得更好的成像效果, 还可以给予速度场更多的地质与地球物理含义。

除此之外, 井控或者说井匹配处理还可以将井旁地面地震道与合成地震记录或 VSP 走廊叠加剖面进行匹配分析, 生成一系列的匹配属性。描述地震资料与井资料的匹配程度的参数, 包括基于频率的可信度、可预测度、测井资料的固有子波和地震子波的传递函数、零相位算子等。井匹配处理的思路是在处理的关键步骤, 尤其是子波处理步骤对处理参数进行定量井匹配分析, 保证应用优选参数后的处理结果与井资料达到最佳匹配。

1.2 基于测井资料与岩石物理建模的地震数据处理监控

基于测井资料与岩石物理建模的地震数据处理监控方法是从事地震反演的服务公司一直以来倡导使用的质量监控体系。他们利用测井资料质

量控制和岩石物理建模研究作为反演的基础, 在国内外很多区块都有成功的案例。图 2 显示了测井地层评价与岩石物理建模基本流程。

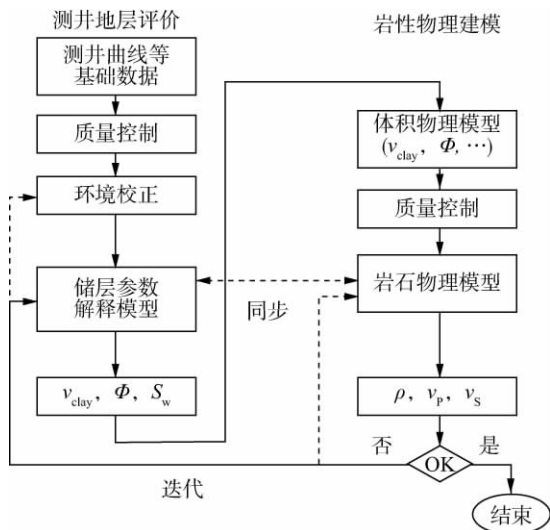


图 2 测井地层评价与岩石物理建模基本流程^②

为什么测井地层评价与岩石物理建模对地震数据处理的监控如此重要? 这是因为通过补齐声波、密度测井等重要信息的缺失段, 校正测量错误段数据之后, 基于多井一致性的测井地层评价和岩石物理建模工作能够提供多井间相对完整、真实的测井曲线, 有效地监控测井资料与测井解释模型质量, 同时也获得了反演所需的可靠、稳定的低频

① 李彦鹏, VSP 在油田开发中的应用及问题分析, 同济大学反射地震学科组研讨会, 2009。

② Fugro-Jason, 从地震到油藏, 辉固地球科技北京有限公司技术手册。

模型,而这正是测井和地震数据相连接的桥梁。更重要的是,以上工作还建立了测井地层评价模型与岩石弹性属性间的相互影响关系,而这正是后续 AVO 研究的基础。例如,流体替换工作不但可以评价泥浆滤液侵入对声波和密度测井的影响,而且可以用于预测地层弹性属性随着含油(气)饱和度变化的规律,而流体替换必须基于可靠的岩石物理模型才能进行。

此外,只有在可靠的岩石物理建模工作完成之后,才有可能建立岩石物理解释量板,定量刻画不同岩性、物性,以及含不同性质流体岩石的响应特征,指导反演数据体储层敏感性测试截止值参数的合理选取,而这正是定量解释的关键所在。

在地震处理质量监控方面,以多井一致性处理及岩石物理建模校正后的测井曲线为基础,可以做以下工作(如图 3 所示):①通过井震标定检查地震

数据的振幅和从中提取的地震子波及其相位特征是否合理(以满足对子波相位有要求的处理模块),同时还可以利用井震标定有效识别多次波,辅助识别全程或微曲多次反射;②利用层位与时深关系信息建立更为合理的初始偏移速度场,提高初次偏移成像精度,减少偏移速度分析的迭代次数;③正演井旁 AVO 地震道集,并通过比较该正演道集的振幅特征与处理后道集是否一致,判断地震道集的相对振幅特征是否得到合理保持,是否符合叠前同时反演对道集质量的要求,如果不符合,则应对相应的地震处理流程进行调整,如真振幅恢复与地表一致性振幅均衡处理等。

综上所述,在岩石物理建模分析后的测井数据井震标定及 AVO 合成记录制作之后,通过井震结合的方式分析道集的振幅特征(时间域、频率域, AVO),判断道集数据是否满足叠后反演与叠前同

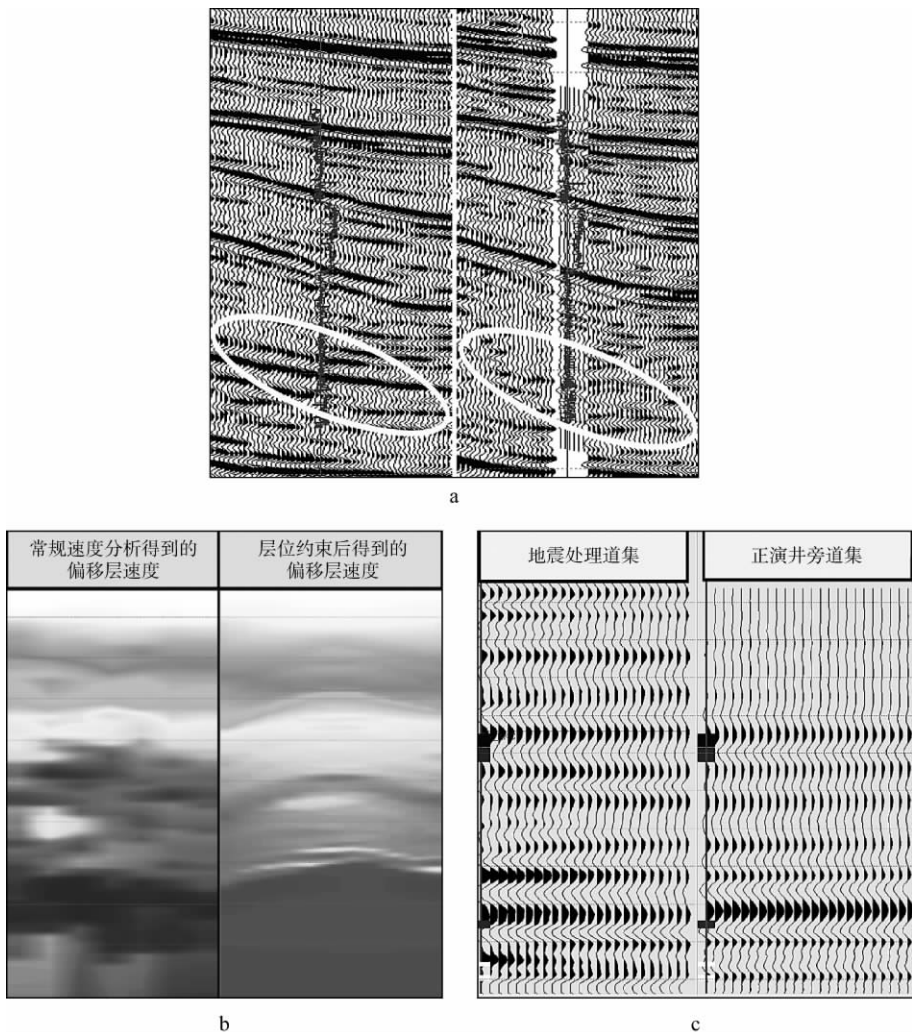


图 3 基于岩石物理建模的地震数据处理监控^①

a 识别多次波; b 建立合理的偏移速度场; c 判断是否保持 AVO 特征

① Fuguro-Jason, 从地震到油藏, 辉固地球科技北京有限公司技术手册。

时反演的输入数据质量要求,在此基础上对道集进行进一步合理的预处理,如残留多次波衰减、剩余时差校正、各向异性速度分析与校正、随机噪声衰减、角度道集计算、部分叠加等,可以为后续地震振幅的定量分析与解释提供高质量的道集数据。

因此,只有在认真细致的岩石物理建模工作之后,才有可能通过叠后约束稀疏脉冲反演与叠前 AVO/AVA 同时反演得到可靠的弹性参数剖面,同时这些可靠的弹性参数剖面才有可能与岩石物理解释量板相结合,实现比较可靠的、具备岩石物理意义的定量储层描述和烃类检测。因此岩石物理建模工作在整个地震资料处理质量监控体系中扮演的角色是如何强调都不过分的。

1.3 基于一致性处理理念的叠前相对保持振幅、频率、相位和波形处理流程与质控体系

随着基于地震数据的储层研究逐步深入,人们愈发深刻地认识到,只有在地震资料处理中体现严格的一致性才能够保护薄储层的地震响应,稍有不慎,薄储层的地震响应就会被湮灭在诸多非储层因素的影响之下。文献[1]强调,一致性处理在薄储层识别方面具有举足轻重的地位,这是因为近地表吸收衰减在空间上的变化所造成的相邻炮道集之间频谱的差异是造成炮道集间能量不一致的主要因素,这种影响远远超过储层本身在空间上的变化对频谱造成的影响,因此只有将近地表的高程变化、速度结构变化以及吸收衰减差异调整到最小,才有可能在时间上和平面上(三维数据)正确地识别薄储层的地震响应。

要衡量一致性处理是否到位,就必须在处理前

对采集数据质量和处理中的数据变化进行定量分析。直接影响地震成像质量的主要因素有:地表起伏变化、近地表岩性变化、静校正量变化(面波、折射波和多次波)、人文干扰大小、大地吸收衰减、高频干扰强弱、激发能量空间变化、观测系统变化等。目前文献[1]提出的一套基于一致性处理理念的叠前相对保持振幅、频率、相位和波形的质量监控体系与地震数据处理流程,能够对上述因素进行有效监控,并且在实际生产中取得了不错的应用效果。相对于常规处理,其最大改进是采用了时频空间域球面发散与吸收补偿方法来消除任意两炮之间吸收衰减规律的差异,其次是将炮点预测反褶积与检波点预测反褶积分两步实施,分别消除近地表在炮道集与检波点道集上造成的虚反射,同时适当提高了时间方向的分辨率。图 4 显示了基于这种思想的处理流程以及相应的监控流程,本文对其中的处理方法与监控过程进行逐一描述。

在数据读入、观测系统加载之后应首先检查观测系统,而后实施如下监控:

1) 静校正量监控。近地表的高程变化、速度结构变化的一致性校正必须通过合理的基准面校正来完成,地表一致性静校正以及波动方程基准面校正可能都是资料处理所需要的,也是关系到最终成像品质的重要因素之一。因此,对静校正量品质的监控需要通过平面、炮道集甚至叠加剖面的品质来进行衡量。

2) 激发能量监控。激发能量是衡量地震数据质量好坏的重要因素之一。它直接反映激发时的状态,是相对保持振幅、频率、相位和波形处理监控

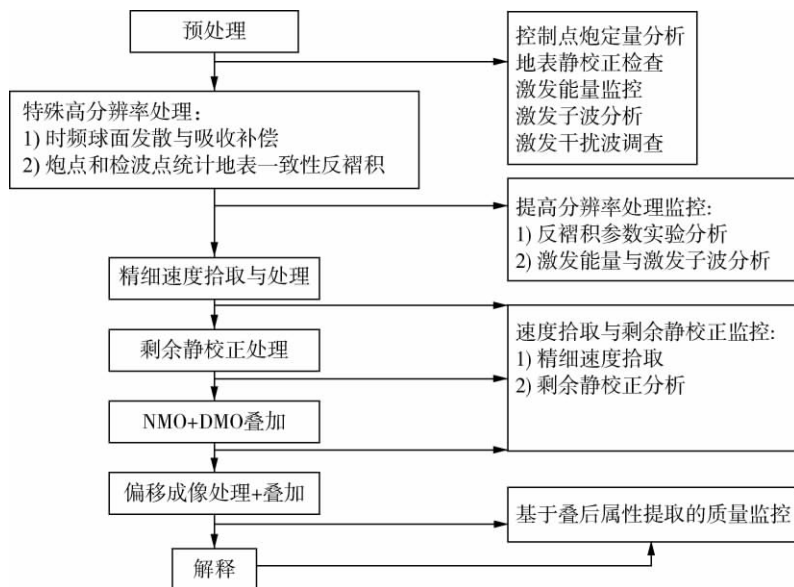


图 4 相对保持振幅、频率、相位和波形的高分辨率处理及监控流程^[1]

的重要依据之一。它的改变会引起地震波振幅、频率、子波形态的变化,从而直接影响高分辨率成像的效果和反演储层信息的可信度。常规处理时通过绘制纯炮集来监控数据激发能量的变化,但是对于具有成千上万炮的三维数据而言,这将意味着需要进行巨量的绘图和人工分析,既不经济,也不现实。选取分析时窗(主要目的层)和分析频率(有效波主频)的三维平面能量监控分析是一种可行的方法,该方法先求取每一炮在某一目的层,或某一频率上的三维数据激发能量的空间变化平面图,再通过选择控制炮来实现对整个三维数据的质量控制,为选择具有代表性的(最好与最差)炮集数据进行定量分析提供了重要的依据。在三维逐炮激发能量检测的基础上实现了整体三维处理的质量监控。图 5 显示了原始三维炮道集在 1 500 ms 处,主频 25 Hz 的能量统计在平面上的分布情况。通过精细的地表一致性处理^[1]可以很好地解决近地表吸收衰减在空间上的变化。

3) 激发子波监控。激发子波是识别储层空间变化的重要信息,然而,在野外采集中影响激发子波

的因素很多,例如激发井深、激发药量以及不同的激发岩性等。这些因素会造成激发子波的空间变化,从而严重影响地震资料识别储层变化的能力。因此,如何快速准确地分析数千炮数据激发子波的变化是处理中十分重要的步骤。炮集统计自相关方法通常可以较好地分析二维数据子波的变化^[1],但用于三维数据了解与近地表有关的激发子波变化仍存在一些问題。文献[3]提出利用统计自相关的零交叉时进行三维激发子波的平面监控。根据零交叉时分析可以得到三维激发子波的空间变化图,结合近地表信息和激发能量信息可以分析激发子波的空间变化,通常激发子波空间变化与地表高程的变化是密切相关的。另外,通过统计自相关分析还可以看出,常规振幅补偿虽然可以消除大部分炮间能量差异和面波影响,但对于炮间频率和激发子波的差异却无能为力。图 6 显示了处理前后子波差异的变化。

4) 激发干扰波检查。地震勘探数据的有效成像除受到激发能量、激发子波、采集观测系统以及实际近地表和大地吸收衰减的影响外,还受到各种干扰能量的影响。采集中存在的高频干扰信息不

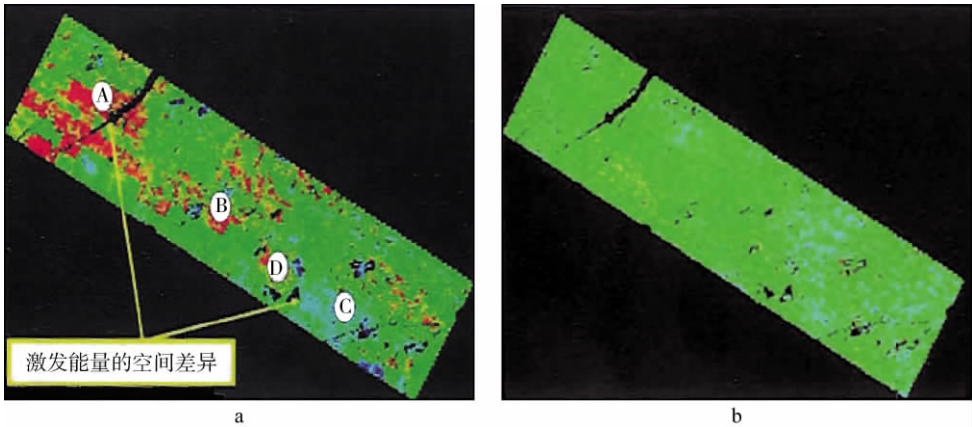


图 5 1 500 ms, 25 Hz 处激发能量的空间差异^[4]
a 处理前能量统计; b 精细地表一致性处理后能量统计

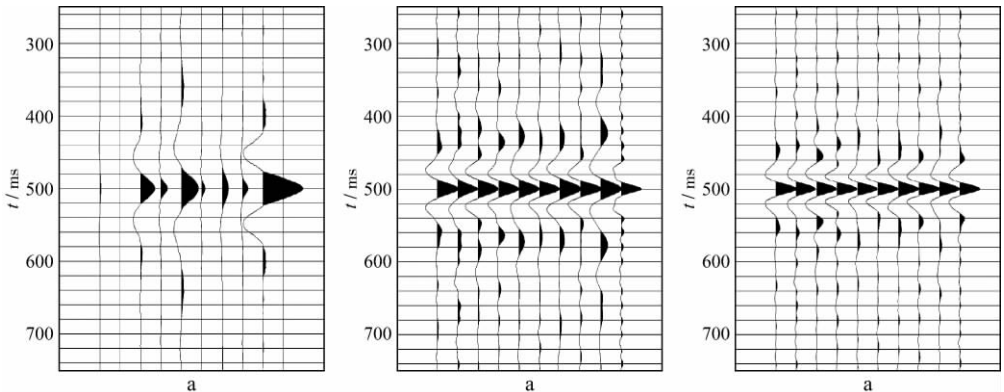


图 6 处理前后子波对比

a 处理前子波; b 常规振幅补偿后子波; c 精细地表一致性振幅均衡处理

随记录时间增加而衰减,因此,在大地吸收衰减的作用下,必然导致资料信噪比随传播距离和频率的增加而降低,这是造成高频地震数据难以成像的主要原因之一。文献[2]提出利用初至前的采集信息,应用公式

$$A_i^{\text{TF}}(f) = \text{MedianFilter}_{j=j_1, \dots, j_2} \left[\left| \text{FFT}(x_{ij}(t)) \right| \right] \quad (1)$$

$$t = t_1 - t_2$$

进行高频干扰的平面分析。其中, $A_i^{\text{TF}}(f)$ 为时频分析的炮集系统统计能量, f 为分析频率; $x_{ij}(t)$ 为采集的地震道数据 ($i=1, 2, \dots, N$, 为炮集号; $j=j_1, \dots, j_2$, 为炮集内分析道号); $t=t_1-t_2$, 为分析时窗内样点。

通过高频干扰的平面图和地表卫片可以发现高频干扰能量与地表有一定关系,这表明地表植被和激发、接收条件是产生高频干扰的主要因素。此外,通过高频干扰的平面分析图信息,可以选择干扰能量最强和最弱的炮进行控制点的分析。

5) 控制点炮定量分析。通过给出控制点炮在各个频率段的纯波显示,可以看出初至前的高频干

扰信息存在微小的差异,这个差异主要是采集时近地表干扰引起的。通过控制点炮定量分析,可以评价野外采集方式对高频干扰的控制是否有效。

6) 反褶积参数试验监控分析。由于近地表岩性的空间变化和激发、接收的变化,通常炮点和检波点存在明显的子波差异。其振幅差异可以通过时频空间域球面发散与吸收衰减补偿方法来补偿,但其波形差异,特别是虚反射的影响,只能靠地表一致性反褶积来消除,从而消除近地表的影响,提高地震分辨率。统计反褶积的目的有两个:一个是提高分辨率,另一个是消除激发点产生的虚反射。从相对保持振幅、频率、相位和波形的提高分辨率流程的最终目的来讲,有效地消除近地表引起的虚反射差异更为重要。同时,在满足一定信噪比的条件下,应尽可能提高分辨率。因此,选择预测步长的主要标准是消除虚反射的效果和成像信噪比,在保证成像信噪比的基础上应尽可能选用较小的预测步长来获得高分辨率的处理结果。图7显示了反褶积后的子波统计自相关随反褶积步长的变化。

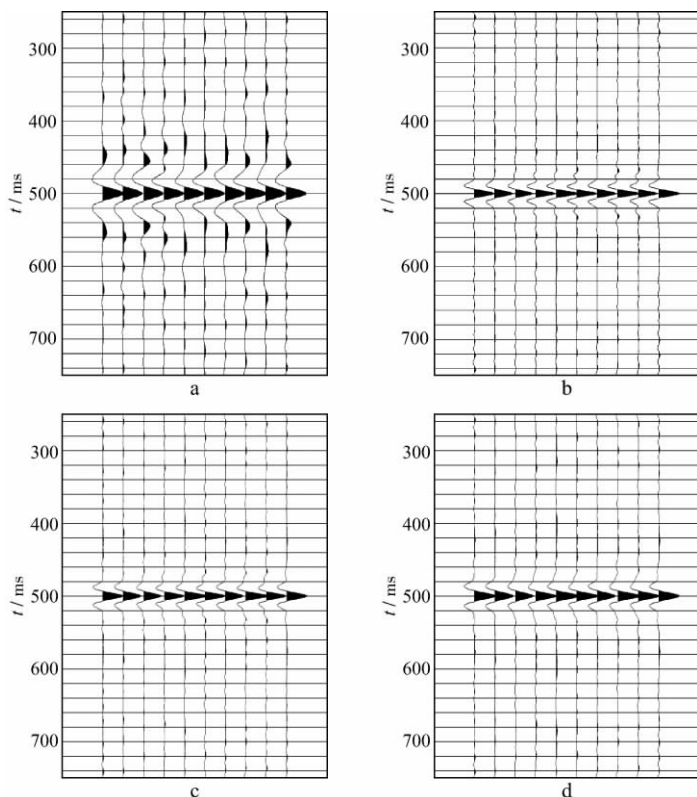


图7 反褶积前后的子波统计自相关

a 反褶积前; b 12 ms 步长; c 16 ms 步长; d 20 ms 步长^①

7) 基于统计频谱的监控。基于统计频谱的监控主要有时频域统计分析与时域统计分析两种方法^[3]。图8a显示了原始炮道集中的4炮在目的层处分析的能量随频率的分布情况,可以看到其频

谱各不相同,频谱的这种差异显然是由近地表的吸

① 杨镛,李大卫,《南海海相碳酸盐岩储层地震地质一体化研究》报告,2010。

收衰减不同造成的。图 8b 则显示了精细地表一致性振幅补偿之后振幅谱的变化规律,可以看到,经过一致性处理后,4 炮的频谱变得比较接近,近地表吸收衰减在很大程度上得到了补偿。图 9a 显示了 4 炮的振幅在某一频带中随时间的变化情况,从

图 9b 可以看到,经过精细地表一致性补偿后,其振幅随时间的衰减得到了很好的补偿。由此可见,上述两种分析方法可以定量分析在不同频带和不同时窗内的能量变化衰减情况,准确地获得地震数据的动态范围。

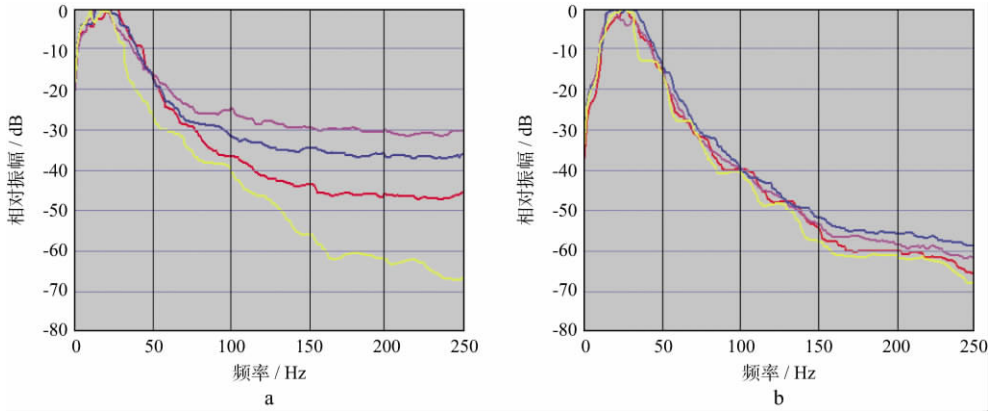


图 8 频时分分析^①

a 一致性处理前; b 一致性处理后

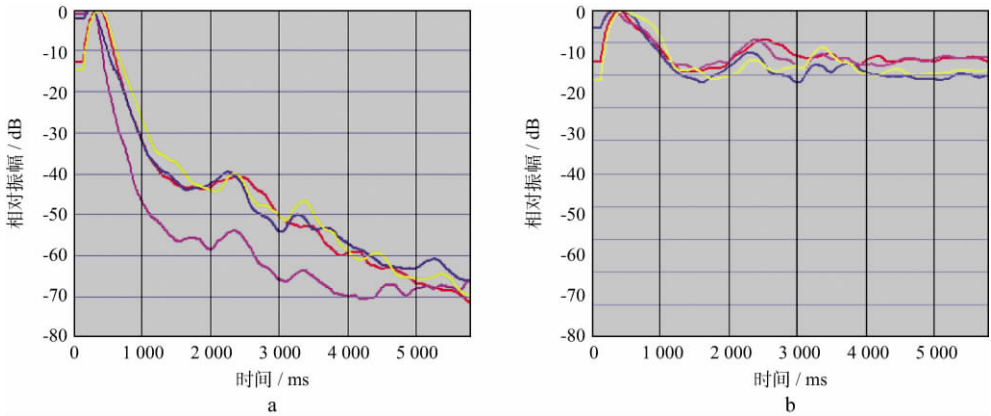


图 9 时频分析^①

a 一致性处理前; b 一致性处理后

8) 速度场精确求取的监控。在叠前相对保持振幅和波形的提高分辨率处理后,另一个影响最终成像分辨率的重要因素是成像速度。在经过高精度速度拾取之后,需要进行严格的速度场质量监控。监控主要采用速度切片、均方根速度剖面 and 层速度剖面,分别从平面上、INLINE 方向和 CROSSLINE 方向检查速度变化的合理性,有无速度突变点,并对存在的速度异常做进一步分析检查。另外,通过层速度曲线和剖面检查有无层速度反转现象和异常点。

9) 基于叠后属性提取的质量监控。基于相对保持振幅、频率、相位和波形的处理要求,在测井信息和参考标准层标定条件下,沿参考标准层进行等时地震属性提取,可使勘探区内地质信息和物探信

息得到统一,同时解决了由于地震分辨率不足而无法拾取储层顶、底界面的问题,因而避免了沿层地震属性提取的穿越问题。地震属性存在于地震数据之中,贯穿于地震勘探的全过程,合理利用地震属性分析地震数据,能够从简单的定性分析上升到定量分析的高度,提高评价地震数据的客观准确性。我们通常通过对振幅、能量、频率、相似系数、相关函数等属性的分析来客观地评价数据质量,分析处理流程和处理参数。文献[1]利用瞬时相位和瞬时频率以及瞬时振幅属性的切片来监控数据处理的质量。同时,作者认为,如果沿参考标准层提

① 杨皓,李大卫,《南方海相碳酸盐岩储层地震地质一体化研究》报告,2010。

取的振幅、频率、相位和波形等地震属性具有相对稳定的一致性,就可以称最终的成像数据满足相对保持振幅、频率、相位和波形的条件。由于这种监控是基于地质认识的一种检测手段,亦可称为地质检测,这是地震地质一体化研究中非常严格同时也是非常重要的一个监控标准。

综合以上9点我们认为,基于一致性处理理念的叠前相对保持振幅、频率、相位和波形处理流程与质控体系监控的实质,就是强调在每一个处理流程后,一致性应该变得更好而不是更坏。在叠前处理的每一个流程都严格禁止算子的时变和空变,以求得振幅、频率、相位和波形在空间和时间上的相对保真,使得薄储层的地震响应不受或者尽量少受近地表吸收衰减、高程、速度结构的横向变化的影响,并使得薄储层的地震响应能够最大程度地在剖面上和平面上得到正确的体现,从而保证后续地质解释、沉积微相分析和叠后反演的精度。

2 结论与讨论

本文系统论述了基于地震地质一体化研究、当前国内外工业界使用比较多的3种地震数据处理质量监控方法。可以看出,基于VSP的井控处理是一个强有力的井震结合的质量监控体系,但是对于一个三维工区而言,需要有比较多的VSP资料才能实现很好的监控,而且,一个比较苛刻的条件是VSP与地面地震最好同时采集,这样二者之间才有良好的一致性,可以互相标定。

基于测井资料与岩石物理建模的地震数据处理监控体系体现了“从地震到油藏”的一体化研究思路。因为反演的最终目的并不仅仅是反演出弹性参数,只有将反演得到的弹性参数与本工区的岩石物性参数之间建立起可靠的关系,才能达到定量解释的目的。从测井资料出发建立工区的岩石物理量板正是出于这个目的。

而叠前相对保持振幅、相位、频率、波形的质量监控方法同样是一个很有特色的质量监控体系,其核心理念是强调一致性在地震资料处理中的重要性。对于陆地资料而言,近地表吸收衰减在空间上的变化对薄储层的地震响应有很大程度的影响,所以如何让近地表吸收衰减在空间上具有一致性就成为这个质量监控体系的核心,也就是在每一个处理流程前后,在平面上和控制线上连续地监控一致

性是否被破坏。这种监控从检测单炮激发能量的一致性开始,一直到基于叠后偏移数据体的地质监控结束,堪称一个非常完整的针对一致性而提出的质量监控体系,在实践中对于薄储层地震响应的正确识别起到了非常重要的作用^[1]。

那么,接下来的一个问题是——对于地震数据处理而言,是否存在一个普遍适用的、放之四海而皆准的质量监控体系,可以将这些不同的监控方法统一起来?随着国家对能源需求的不断加大、油气资源勘探的不断深入和项目研究周期的不断缩短,任何一个环节的疏忽都可能造成整个项目的失败。在这样的背景下,处理解释一体化、地震地质综合研究一体化、从地震到油藏综合研究一体化的研究思路迟早将成为勘探地球物理界的常规研究思路,在一个项目组里,处理、解释、反演的界限将变得日益模糊,地震、地质、岩石物理等不同学科成员的协作却变得日益紧密。由于每一个工区的勘探目标不同,构造与沉积特征不同,目标体的地震响应不同,因此需要监控与把握的特征自然也应该不会相同。一个统一的质量监控标准对于某一个中间处理环节可能存在,但是对于不同的勘探目标与不同工区之间千差万别的地质地球物理情况,提出一个统一的质量监控标准既不现实、也无必要。因此,具体问题应该具体分析,不同的勘探目标应该有不同质量监控标准。但是,一套严格的、具有针对性的质量监控体系在某个工区一旦确立,就必须在项目实施过程中的每一个中间环节对资料处理的品质进行严格的监控和评价,除此之外别无选择。这就是我们对于地震数据处理监控的结论与认识。

参 考 文 献

- 1 凌云. 地震数据采集、处理、解释一体化实践与探索——凌云文集[M]. 北京:石油工业出版社,2007. 1~358
- 2 凌云. 时频空间域球面发散与吸收补偿[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(2):176~182
- 3 凌云. 三维地震数据的分析与检测方法研究[J]. 石油地球物理勘探,2002,37(5):433~440
- 4 凌云研究组. 叠前相对保持振幅、频率、相位和波形的地震数据处理与评价研究[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(5):543~552
- 5 王成彬. 井控地震资料处理技术及其在LS地区的应用[J]. 石油物探,2008,47(4):381~386

(编辑:戴春秋)