

油气地球物理技术 新进展

—— 第71届、72届SEG年会论文概要

张永刚 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

内 容 提 要

该书是美国第 71 届、72 届 SEG 年会论文概要。内容包括复杂地区三维地震资料采集技术、AVO 技术、井中地震技术、地震综合解释技术、油藏描述技术、地震数据处理技术等 20 个专题。

该书可供从事地球物理技术研究的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气地球物理技术新进展:第 71 届、72 届 SEG 年会论文概要/张永刚主编. —北京:石油工业出版社,2003.9

ISBN 7-5021-4370-X

I. 油…

II. 张…

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(2003)第 077470 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 430 千字 印 1—1000

2003 年 9 月北京第 1 版 2003 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4370-X/TE·3058

定价:50.00 元

目 录

复杂地区 3D 地震资料采集技术	徐国庆 胡中平(1)
AVO 技术及其在油气检测中的应用	郭全仕 严建文 朱海龙(9)
地震各向异性研究	朱成宏(29)
井中地震技术	曹 辉(48)
井中非地震地球物理技术	朱海龙 李智宏(61)
地震综合解释新技术、新方法	张卫华(67)
地震解释技术的应用	关 达(80)
地球物理反演技术及其应用	孙晶梅(89)
层析成像技术与史例	陈国金(106)
三维叠前偏移技术	方伍宝(118)
多分量地震勘探技术	黄中玉(128)
油藏描述技术	严建文 周开凤 朱文杰(146)
时延地震技术	杨勤勇 潘申平(165)
岩石物理研究	马中高(175)
地震数据处理技术	赵改善(191)
多次波衰减技术	郭全仕(205)
地震理论研究	高 林 刘 刚(216)
地震速度分析技术	孙开峰(227)
波场数值模拟技术进展	余德平(238)
VSP 技术的应用和发展	陈 林(248)

复杂地区 3D 地震资料采集技术

徐国庆 胡中平

一、引言

采集是地震勘探的基础,涉及降低成本、优化设计等诸多方面的因素。国内外勘探地球物理界对此一直十分重视。纵观最近几年 SEG 年会有关采集技术方面的文章,我们发现,论文主要关注这样几个方面的问题:(1)在受仪器道数等设备条件的限制下,如何利用合理的采集设计技术节省时间、节约资金,在有限的时间内完成地质任务。(2)传统大面元三维观测系统的地震采集缺少近道小偏移距资料,导致静校正、浅层速度分析及深度求取等方面存在缺陷。(3)复杂区域(如速度反转层、强多次波干扰等特殊地质体)的地震勘探,常常由于高速层的屏蔽、强干扰等因素导致资料信噪比不高、资料质量不好,影响后续的处理、解释,进而影响地质任务的完成。(4)常规方法基于共炮集(CSP)射线追踪方法来确定采集参数,但当遇到岩丘、复杂构造等特殊地质体时,在这些区域往往出现反射盲区,得不到高信噪比、高精度的地震资料。

针对以上一些问题,国内外开展了大量的研究,取得了一些进展。

此外,采集方面,研究人员在可控震源、超多道地震仪、检波器、海洋勘探技术以及设备等方面也进行了大量的研究。下面在综合的基础上,分五个方面介绍几种采集方法及应用实例。

二、X 型炮线观测系统

在进行一个勘探区块的采集设计时,考虑到仪器能力、时间、财务预算等方面的限制,设计一个有经济效益、技术合理、能解决地质问题的观测系统是十分必要的。X 型炮线观测系统的检波器排列布设与传统方法一致(如六条平行检波线),一对炮线形成 X 形状,X 的两支分别与检波线对称斜交,X 的中心点为检波线排列的中心点,炮线沿检波线方向移动(图 1)。此设计的关键主要体现在野外排列方式的对称性:“对称采集”方法效果较好、“四分网格”方法可以更好地压制噪声。

1996 年和 1997 年在阿尔及利亚的 Reg 和 Krechba 油气田应用了这种观测系统。当时其地震队地震仪道数最大只有 1000 道、两套可控震源。队伍具有很少的三维地震施工经历,经费预算和时间都比较紧张。勘探区块的地质特征为断层边界、高起伏的反转背斜,勘探目标为构造成像、确定断层组合以及为油藏描述提供必要信息。通过应用 X 型炮线观测系统(图 2)完成了这两个区块的勘探任务。

1999 年后,施工的地震队逐渐配备至 3500 道,受到此次勘探结果的鼓励,2000 年应用此方法在另一个区块(Tig)进行了施工(图 3),这些设备至今仍在使用中。

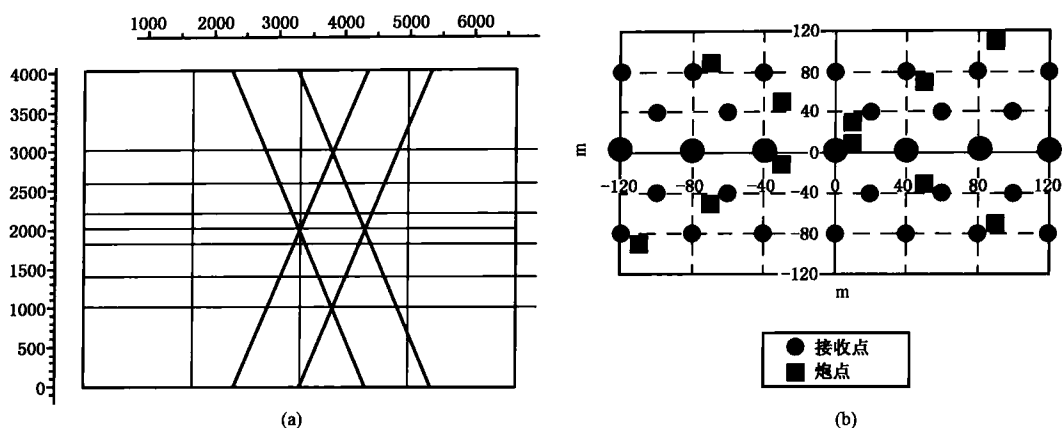


图 1 X 型炮线观测系统示意图(a)及四分网格示意图(b)

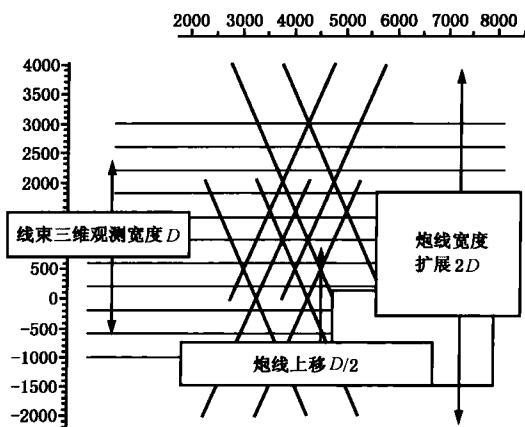


图 2 Reg 和 Krecha 三维区块观测系统图

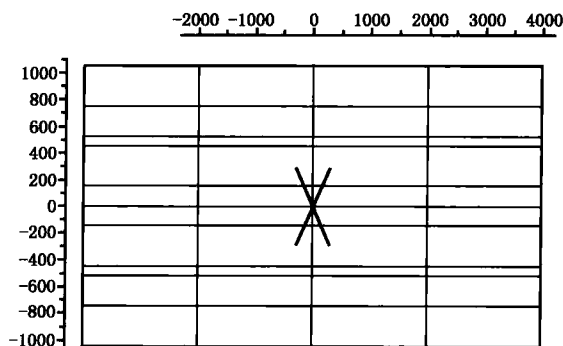


图 3 Tig 区块三维区块观测系统图

三、针对大面元三维观测系统的地震资料采集技术

针对深部目的层进行常规大面元三维观测系统设计时,本身没有考虑到浅部地层因素。相对于大面元三维观测系统,浅部地层覆盖次数低,导致了后续处理如速度分析、静校正难度加大。这里介绍一种改善大面元三维观测系统设计缺陷的方法—即常规大面元三维观测的同时沿检波线增加炮点。

考虑到成本及时间关系,三维设计通常要求在单位面积上有较少的炮点和检波点,即采用大的炮线距和检波线距,地下面元受炮点距和检波点距的控制。在进行深层勘探时,为提高效率通常采用大面元的方法,这种方法导致了近偏移距资料的不足,从而影响浅层地层成像及静校正精度。同时近偏移距数据的缺失导致浅层速度信息的丢失,而该信息的丢失影响对深层的研究。

在沙特阿拉伯一个小规模大面元三维勘探中,仪器道数 480 道,满覆盖为 30 次,五台震源车组,生产效率为 $9\text{km}^2/\text{d}$,所取得的资料是比较好的。但由于缺少浅层资料,影响了最终解释。

在随后的大规模勘探中,采用 960 道仪器采集,两台震源车,经过重新设计,炮点密度与前次相同,但覆盖次数达到 60 次,其生产效率平均达到 $21\text{km}^2/\text{d}$ 。

这次设计采用了组合设计方法,在常规大面元三维观测系统中综合使用了直角观测系统和部分平行二维观测系统:直角部分采用了十字排列采集技术,它获得了大面元的三维数据,主要解决地下深层构造成像,完成地质任务要求;组合平行二维主要是为了克服十字排列设计中由于缺少近偏移距不能解决浅层速度、静校正等问题所采取的措施,即在同一个排列上增加了平行排列炮点,增大了深层和浅层的覆盖次数,使得静校正、浅层速度分析、深度求取等问题得以解决。图 4 为野外观测系统示意图。

实践表明,由于在十字排列中增加了平行排列观测系统,增加炮点密度约 30%,生产效率只下降 15%,但足以解决许多问题。两种观测方式使用的是同一个检波器排列,因此增加的仅仅是震源点的投入。这对于可控震源等较廉价震源系统是值得的。

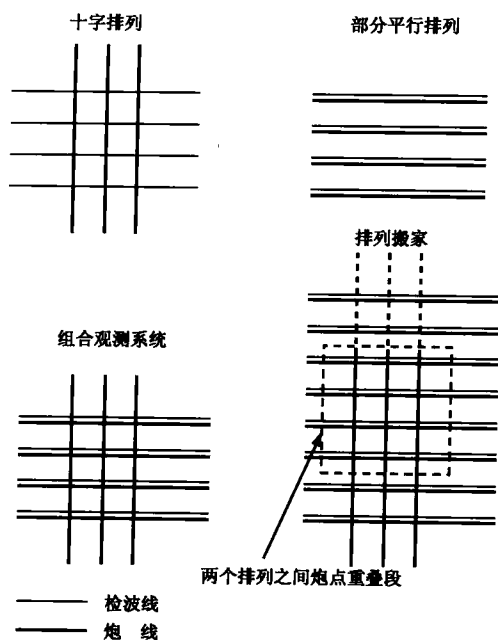


图 4 改进后的大面元三维观测系统

四、宽方位、长排列三维地震资料采集技术

宽方位、长排列三维地震采集设计技术较新颖,它利用扩展排列技术采集地震数据。复杂构造条件下(复杂速度场、复杂地形、静校正不准、波的强绕射和散射、强多次波…),常规方法获得的地震资料信噪比不高。宽方位、长排列三维地震采集技术方法即在常规设计地震采集的同时在整个有效偏移距范围内布置独立的 3C 检波点,这些检波器与其他检波器同时进行采集。常规排列按三维设计正常滚动,3C 检波器固定不动。这种方法能够接收到大偏移距回转变和广角反射,同时还不丢失常规近偏移距垂直反射信息。处理阶段利用透射波和反射波的层析成像技术能够确定详细的速度模型,由广角反射提供的高信噪比资料使得叠前深度偏移能利用所有有效偏移距范围内的数据,提高了深度成像的能力。

2000 年在意大利 Apennines 南部的一个探区应用了这种设计方法。该区主要地震地质特点:推覆构造、页岩泥岩互层等导致速度反转。在常规资料上表现为:强交混回响、强散射、强多次波。采集设计时利用 Global offset 设计方法进行设计,达到取得包含回转变、首波、广角反射、及近垂直反射的地震资料。有两种设计同时体现在施工中,一种是宽方位长排列设计(3C 检波器)、一种是常规三维,两种排列的记录系统由 GPS 进行同步(如图 5 至图 7)。

图 5 中,3C 检波器布设在炮能量能够达到的有效偏移距范围内。

从图 6 可以看出,Global offset 比常规设计方法排列要大、方位角分布广。

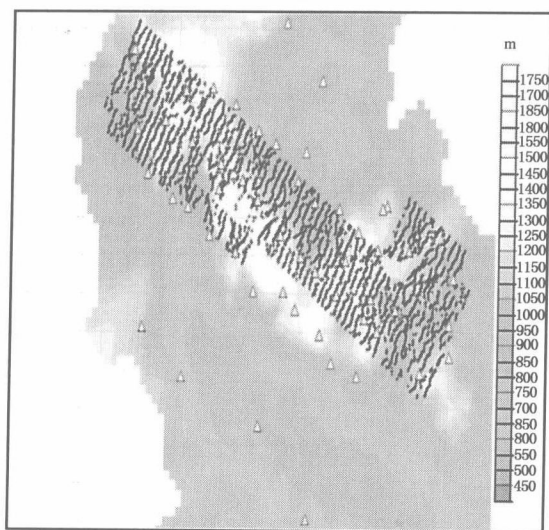


图5 3C记录站点($\triangle$)与炮点($+$)分布

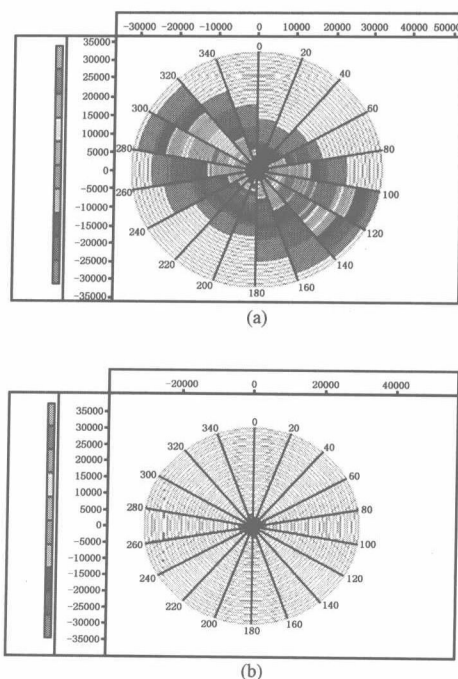


图6 Global offset 设计玫瑰图
(a)宽方位;(b)常规

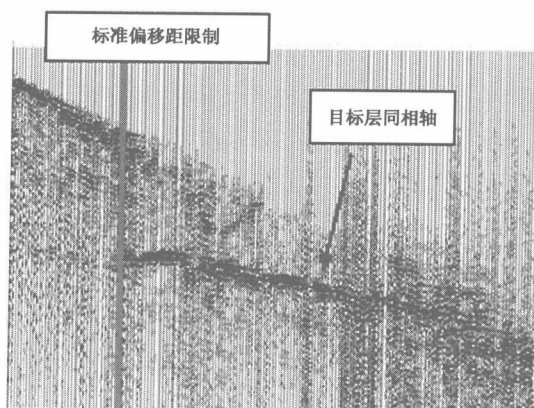


图7 Global offset 设计方法取得的包含
广角反射轴的单炮资料

从图7上可以看到明显的广角反射,而在近道由于高速层的屏蔽,看不到该反射层。由此可以看出,如果用常规设计方法,将得不到该层的反射资料。

从观测系统的玫瑰图上看,常规设计获得了小偏移距的反射,宽方位长排列方法方位角分布广、排列范围宽。在远排列资料上明显看到了广角反射,并且其信噪比远比近道资料高。

在资料处理上与常规资料处理方法不同。利用大范围偏移距获得的回转波进行层析成像是估算信号从地表到震源穿透深部的最好方法。另外,利用远、近偏移距的反射进行层

析成像可以得到精细的深部构造和层速度。一旦获得速度模型,就可以进行全偏移距资料的叠前深度偏移和精细的偏移速度分析,进行深度成像。

实践表明,这种观测系统比常规观测系统采集需要增加约5%的投资,但其产生的效益却是得到了更广的方位角、更宽的偏移距范围的地震数据,并且在特定地质条件下这是惟一可用于解释的数据。

五、基于 CRP 的优化采集设计技术

传统采集设计都是基于共炮集(CSP)射线追踪,但对向斜、底劈构造以及其他一些复杂构造,特别是这些复杂的地质体与围岩速度差异较大时,传统方法设计的采集参数有可能使这些部位成为反射盲区,不能对这些地质体进行有效成像(图 8)。而根据 CRP 模型设计可以很好地设计采集参数。对于复杂构造来说,分析波场特征非常困难,传统方法不是最佳方案。这里的方法是通过共反射理论模型的计算,确定针对这些复杂地质体在什么地方布设炮点和检波点才能得到最强的反射信息。利用这种方法可以优化采集参数、提高资料质量,节约勘探费用,同时还可以控制资料处理质量。

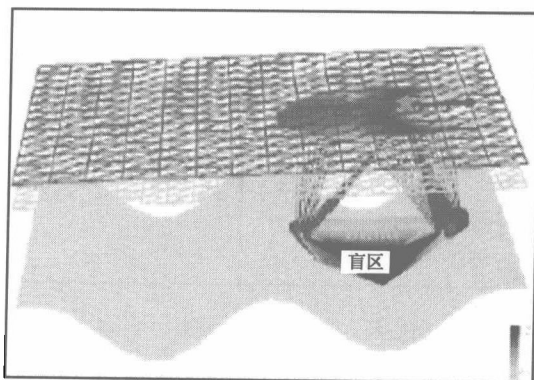


图 8 利用 CSP 模型方法将在某些部位产生反射盲区

1. CRP 射线追踪和叠加

给定目的层上的一个点,以此作为一个点源,建立初始波场,波前沿常规的射线路径向上传播,到达地面后形成一个多值波场,按 Fermat 原理在众多的强能量位置寻找旅行时最小的射线路径。能量计算遵循能量守恒定律和光强原理。

对地表上的每一个网格点我们都能沿射线路径反向追踪到目的层处的点源,这样,对应地下界面网格点上的的每一炮都能在地表生成这样的振幅分布。根据能量守恒定律,地表每个网格点上的能量总和等于地下界面上每炮能量总和。当计算完所有的炮点及检波点处每炮对应的能量值后,对地表每一网格点上的振幅值进行叠加,就可得到地表和目的层的振幅分布图。

理论和实际表明,地表的 CRP 叠加振幅分布图可以用来优化采集参数,目的层的振幅分布图可以用来与叠前偏移结果进行比较,用于控制资料处理质量。

2. 理论模型分析

图 9 为图 8 对应的一个 CRP 点产生的振幅分布图。

从图 8 向斜构造的 CSP 模型图上可以看到,CSP 模拟放炮在向斜位置出现反射盲区,常规观测系统设计在该区域将得不到向斜区域的地震信息。图 10 为所有 CRP 点产生的地表及地下振幅分布图,可以看出,只要合理布置炮、检点位置就可以避免盲区,达到优化采集设计的目的。

图 11 至图 13 为墨西哥湾的盐体模型 CSP 及 CRP 模拟放炮在地表及目的层上的振幅分布图。该例子的地质模型是 10 层沉积层含 4 个盐体。首先按 CSP 放炮设计了 4 条检波线,检波线长 6km,道距为 100m,共设计 2250 炮。从图 11 上看,将会在盐体部位产生“盲区”,得不到有关盐体部位的好资料。

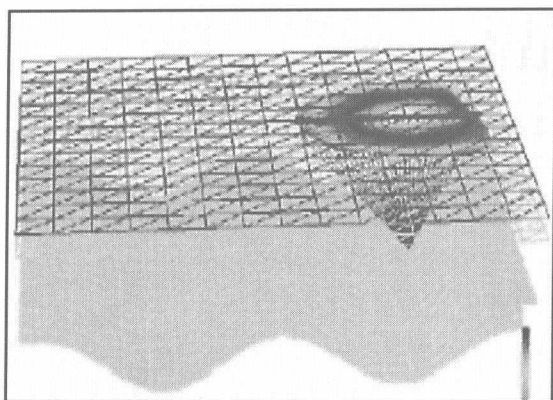


图9 图8对应的一个CRP点在地表产生的振幅分布图

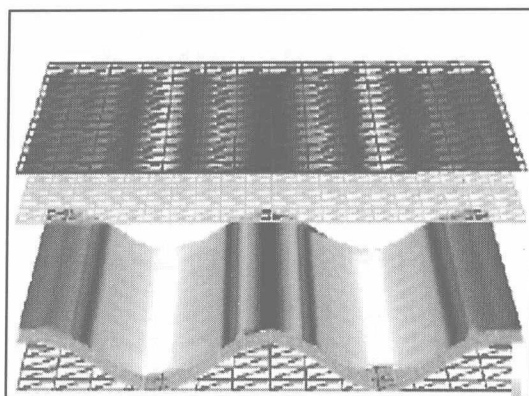


图10 所有CRP点产生的地表及地下振幅分布图

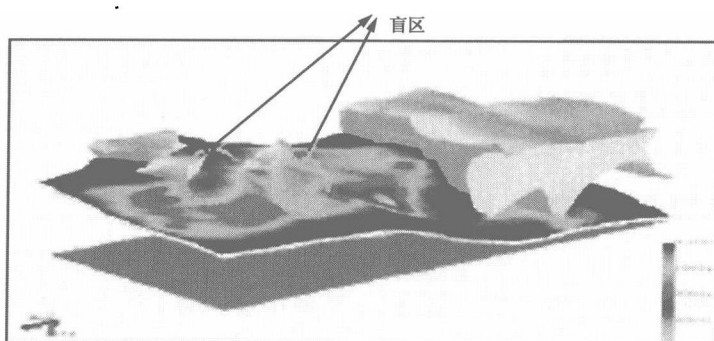


图11 目标层上基于CSP放炮的振幅分布图

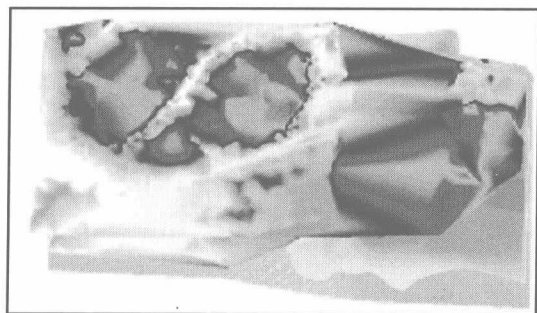


图12 基于CRP叠加的地表振幅分布图

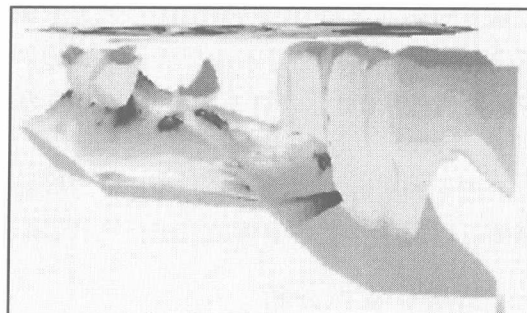


图13 基于CRP叠加的目的层振幅分布图

在相同的模型上,进行了CRP叠加,得到了图12、图13CRP叠加的地表及目的层的振幅分布图。从图13上看在CRP叠加模拟下,几个盐体的反射“盲区”消失。从图12可以分析设计如何布置检波器点和炮点。同时从这两个振幅分布图还可以调整拖缆长度及面元大小。

六、频率调制技术——一种新的采集思路

可控震源是一种频率调制系统,其作用是入射信号频率可以人为控制,同时可以提高效率、降低成本。可控震源信号包括两个部分:载波和地震信号。利用检波器频率调制技术开发

出一种新的系统,这种新系统称之为 SeisFM ©和 SeisPAD ©。可以简单理解为在同一站点放置不同自然频率检波器,放炮时两种检波器同时接收,分析不同自然频率检波器采集资料的振幅、频率、相位及其差异等信息与地下油气藏的关系。

如图 14 为 10Hz 检波器及 28Hz 检波器采集的单炮资料及相应频谱。图 15 为两种检波器采集数据的叠加及某一目的层处的频率分析图。

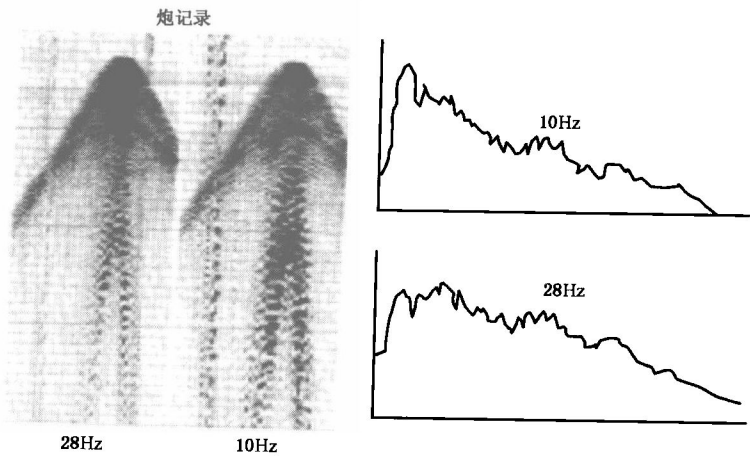


图 14 10Hz 检波器与 28Hz 检波器同一位置记录单炮及频谱

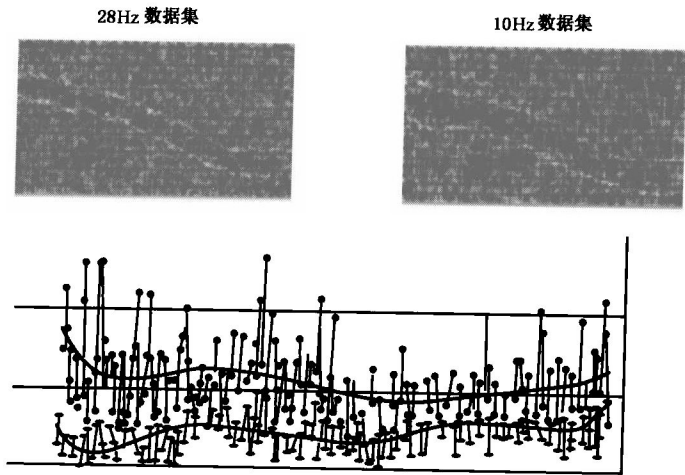


图 15 10Hz 检波器与 28Hz 检波器记录的叠加及某一层位的频率分析

该试验采用 6 个 10Hz 检波器组合和 6 个 28Hz 检波器组合放在同一站点单独记录。从以上图 14 可以看出单炮上二者的频谱存在一定的差别,从图 15 上看出,特定层位处二者频率、振幅等也各有不同,这说明地下特定地质体对不同自然频率检波器响应不一样,仔细分析和研究这些差异有助于油气藏的发现。

七、结束语

随着地震勘探的深入,绝大部分地区都已开展过常规地震勘探。在复杂地表、复杂构造地区进行勘探时,首先要进行采集方法研究。采集技术设计不仅仅要考虑完成地质任务要求,同

时还要考虑到现有的经济、技术条件(硬件、软件、人才)、装备条件,以及完成地质任务的时间要求等等。只有在全盘考虑各种因素后,在采集技术设计的基础上才能进行合理的地震勘探,完成地质任务的要求。针对复杂地区的采集方法,专家们已进行了多年的研究,在近几年的 SEG、EAGA 等大型国际会议上有关采集方法研究的结果和文章逐年增多。本文介绍的 SEG 年会上有关采集方法研究的内容主要有:(1)X 型炮线观测系统。解决在现有装备、资金等条件下进行经济、合理的采集。(2)沿检波线增加炮点的方法。解决常规大偏移距采集方法中缺少近道小偏移距资料的问题。(3)解决复杂地区地震资料采集的宽方位、长排列三维地震采集技术。(4)提出了基于 CRP 的优化采集设计技术,解决了构造复杂时用常规方法出现的盲区问题。(5)提出了频率调制地震的新的采集思路。

本文介绍的几种采集方法是诸多采集方法中的一部分,具体应用需要根据实际地震条件进行详细研究。

AVO 技术及其在油气检测中的应用

郭全仕 严建文 朱海龙

一、引言

AVO 技术从出现到现在不到 20 年,已经历了狂热—冷落—思考—发展—成熟几个阶段。可以说,目前 AVO 技术已相当成熟。尽管 AVO 处理和解释仍然存在许多难题,但越来越多的专家认为,只要分析工作做得足够细致,AVO 是惟一可以用来定量预测岩性与油气的地球物理技术。细致的工作包括岩石物理分析、精细地震资料保幅处理、井资料标定和约束、适当的反演和解释方法等。AVO 技术发展的主要标志为上世纪末(1998—1999 年)涌现出的一些新技术,如 AVO 交会图、弹性波阻抗反演、拉梅常数反演及 TI 介质中 AVO 简化方程。

在 2000 年和 2001 年 SEG 年会上,不考虑地震解释、油藏描述、四维地震等专题上含有的 AVO 技术应用论文,仅 AVO 技术专题共有 9 个专题,论文总数近 70 篇。本文力求从中选取部分较有代表性的文章,对两届 SEG 年会上的 AVO 技术发展作一综述。

二、AVO 敏感性和有效性

1. 影响 AVO 的因素

由于 AVO 是根据 Shuey 简化方程处理地震数据,它同实际的物理现象相距甚远,这就造成解释上的困难,幸而弹性波阻抗(EI)的出现使我们有可能克服一些处理上的难点(如振幅均衡和 NMO 拉伸),但仍有一些问题(如 NMO 剩余误差和多次波)必须引起重视。现行的 AVO 分析有两种主要途径,一种是直接利用叠前数据的属性反演(常规 AVO 方法),另一种是采用限角度数据地层反演(弹性波阻抗方法)。不管采用何种方式,它们都有相似之处:同一方程(Shuey 近似式),同样几何关系(入射角)和相同的输入数据(NMO 校正,叠前时间偏移),不同之处在于后一种方法允许子波随偏移距变化。Cambois 指出一些影响 AVO 处理结果的主要因素以及需要注意的问题:

噪音的影响:对于正常噪音,最小二乘公式的误差说明用 Shuey 公式提取的属性对噪音的放大倍数(用叠加后的标准差归一化),如图 1 所示,截距的误差几乎不受最大入射角的影响,虽然梯度的不可靠性随角度范围的增大而有所改善,但对于小入射角范围的属性反演,梯度项将

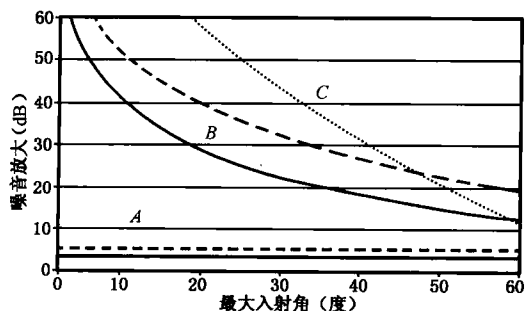


图 1 AVO 属性对噪音(相对与叠加)的响应与最大入射角的关系

图中实线为 Shuey 两项拟合公式,虚线为三项拟合公式

极不可靠,注意反演出 S 波和 σ 振幅的不确定性与梯度项相同。如果采用三项拟合,在大入射角情形下,导出公式的第三项将降低截距(1.5dB)和梯度(10dB)的可靠性。

振幅校正:球面扩散补偿和 Q 补偿是资料处理过程中必不可少的手段,但由于地下的复杂构造和对地层衰减特征缺少了解,恢复的振幅将不能完全令人满意,因此在 AVO 处理前,尤其是陆上资料,还需要在时间和偏移距上进行振幅均衡处理。这样的工作对 AVO 的结果会产生欺骗性:它增加了截距项泄漏即增加了梯度项振幅。好在 EI 方法可以避免振幅在偏移距方向的影响,但需指出的是,AVO 处理流程中 AGC 处理须是大窗口。

子波变化:子波形态可能随时间、空间和偏移距变化,在保持振幅处理流程中,时变子波可以用特定的 Q 补偿来处理,空变子波用地表一致性来解决。主要的问题是子波随偏移距变化,低通、混合相位和非平稳滤波器对此均不能有效解决,采用 EI 反演可避免这个问题,但值得注意的是分辨率问题,反演出的数据体应该具有相同的频带,也就是最大角度道(频率最低)决定了最终结果的分辨率。

NMO 校正:除了 NMO 拉伸,NMO 剩余误差也是一个令人头痛的问题,因为 Shuey 模型是假定反射同相轴采样点完全对齐,未校齐误差会造成严重的截距项泄漏,EI 反演对此同样敏感。我们需要做的是精细拾取速度,严格质量控制,尤其当存在第二类 AVO 异常时,需更加小心谨慎。其它造成反射点不能对齐的原因还有长波长静校正,广角残差和非双曲线反射。

多次波衰减:多次波的存在将严重干扰 AVO 属性和岩性反演。一些多次波衰减方法可以说是有害的,因为在压制多次波的同时,它们也损害了部分偏移距上有效波振幅,即使是保持信号的高分辨率 Randon 方法,也不能完全消除多次波。剩余多次波能量,尤其当存在小时差多次波时,仍然是常规 AVO 和 EI 反演方法共同面临的主要难题。

各向异性:各向异性和简单 NMO 方程的误差将造成大偏移距地震道上同相轴上翘,这需要同进行四次项进行校正。各向异性又增加两个难题:AVO 方程变化和可用的人射角范围减小,它们导致用更少不可靠数据来估算属性。对大偏移距道上的这些不确定信息的定量利用还有一段路要走。

在 AVO 交会图中,背景趋势的解释与岩石的 v_p/v_s 的总趋势有关,当 v_p/v_s 增加时,P - G 交会图上背景趋势的斜率就会变得平缓,S. Xu 等在分析实际资料时发现:根据 Shuey 方程,背景趋势应该过原点,一般体数据能符合这个规律,但沿层数据的背景趋势并非如此;再者,代表了占地层岩石总数 75% 的页岩的 $v_p/v_s = 2$,其背景趋势的斜率应为 -1,但实际观测的背景斜率要陡得多。他们用简单夹层模型模拟砂岩孔隙变化并和实际资料对比分析后,认为:(1)Castagna 理论背景趋势比实际背景趋势的斜率平缓,主要是因为假设 v_p/v_s 为常数,它往往与实际地层不符;(2)数据体的背景趋势与沿层的背景趋势有着本质上的不同,这两种趋势的斜率只有当湿砂岩与页岩的 v_p/v_s 相同时才是一样的;(3)体背景趋势的斜率通常比 -1 陡得多;(4)沿层背景趋势更像是岩性(孔隙)的趋势;(5)尽管地层中页岩占岩石总数的 75%,但页岩 - 页岩和页岩 - 粉砂岩间的反射率太弱,不至于影响到背景趋势,地震上观测到的背景趋势实际上被只占总反射 10% 的较强反射所控制,这可能是我们认为它代表了泥岩背景趋势的错误所在;(6)当没有井资料约束时,确定背景趋势是非常困难的。

G. Partyka 和 P. Whitaker 利用墨西哥湾 King 油田同一储层的两口井资料,采用流体替换和储层总厚度变化模拟出的 AVO 合成数据与实际地震资料对比,通过对随偏移距变化的能量、相位和频率的变化特征分析后表明:滑动叠加和储层总厚度对 AVO 特征(包括截距和斜率)有明显的影响,处理中的滑动叠加会压制 AVO 效应。影响 AVO 属性还包括振幅比例,

实际的 AVO 道集和模拟的 AVO 道集必需具有相同的尺度,它包括相同的相对比例和绝对基准比例,没有这种等同,实际数据的 AVO 定量分析是难以令人置信的。对于独立的地震数据体和 4D 地震中的时延数据体,作 AVO 预处理时应更加小心。

2.AVO 预测的有效性

反演问题的有效性取决于储层的岩石性质和几何尺寸(厚度),利用岩石物理性质正演模拟是解决这个问题的较有效的方法,对于不同地区的不同储层往往会产生不同的结果。对于目前广泛使用的 AVO 岩性估计方法,C. Ross 对其划分岩性的有效性进行了评价。他利用实际测井资料,采取流体和厚度替换方法,模拟页岩中夹砂岩储层的合成地震道集。分别采用 $\lambda\rho - \mu\rho$, $AI - EI$ 和 $P - G$ 交会图在不同角度范围内定量检测含气砂岩的范围,结果表明,截距-梯度($P - G$)属性:大角度范围的 $P - G$ 交会图在储层沿层面对含气层范围的划定好于 $AI - EI$ 和 $\lambda\rho - \mu\rho$ 交会图,但由于子波的影响,在纵向上的分辨率差,EI 和 LMR 方法因为是通过叠前地震反演获取,需要有初始模型和井的标定和约束,如果没有精确的初始模型和井资料,会导致反演结果的不准确。所以必需意识到,对于不同工区的不同储层段,并非所有的 AVO 属性能取得相同的结果。有效的做法必需利用已知储层的特征,模拟和比较所有的 AVO 方法,选择其中最有效者。

在 AVO 可靠性研究中,储层的弹性特征(岩石物理)对流体变化的敏感性及对地震波的响应研究非常重要。E. F. Gonzalez 等为了量化委内瑞拉东部的一个油田气砂岩的 AVO 响应,通过对模型分析方法解释 AVO 可靠性问题,模型分析包括根据声测井计算合成道响应,并用 Monte - Carlo 模拟分析 AVO 响应特征变化的不确定性,说明采用 $P - G$ 交会图划分储层岩性的准确性的概率只有 70 % ~ 80 %。

三、AVO 真振幅与处理

1. 角度道集转换

AVO 分析中最重要的步骤是从偏移距到入射角的变换。基于非双曲线时差方程,Richard Bale 等讨论了适用于 PP 和 PS 反射的偏移距到入射角变换,并用模型和实际数据集说明了方法的效果。

标准的双曲线时差公式由于忽略了地层的分层性和各向异性,所以在大偏移距时会造成典型的过校正,即“挂面条”现象。他们采用加四次项的 Alkhalifah 和 Tsvankin 时差公式,即从 η 校正公式出发,计算出射线参数,建立双程时与反射层入射角间的映射关系,该校正公式可以准确地获得大偏移距时偏移距到入射角变换。

对 PS 转换波,入射角和反射角不再相等。PS 波偏移距到入射角变换不符合双曲线公式,他们为了正确地配置数据的共反射面元(图 2),

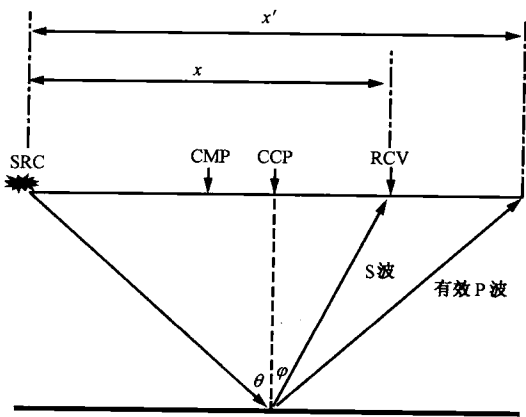


图 2 转换波偏移距到入射角的变换
入射角 θ 对应于偏移距为 x 的转换波,该角度与偏移距为 x' 的纯波的人射角相等, x' 等于炮点到共转换点 (CCP) 之间距离的两倍

必须计算共转换点(CCP)。有了 CCP 的信息后,就可以计算具有相同入射角的对应 PP 反射的等效炮检距 x' 。将震源到 CCP 的距离称为 CCP 炮检距。按 CCP 和 CCP 炮检距索引的道集可以用与 P 波完全相同的公式把炮检距变换到角度道集,但此时应该用等效炮检距 x' 。

2. 保幅 PsDM(叠前深度偏移)

虽然目前 AVA 分析是在未偏移的叠前资料上进行,但越来越多的证据表明,更可信、分辨能力更强的 AVA 属性可以在叠前时间或深度偏移后用反演得到。由于 PsDM 对波传播过程近似描述的限制较少,至少在理论上,PsDM 直接给出反射点位点,即 AVA 目标位置,应该具有更高的分辨率和精度。

要在 PsDM 之后进行 AVA 反演,振幅保持自然是 AVA 反演获得成功的重要保证。有两种方法可以采用。经典的处理流程为在处理中加一个保持振幅的预处理步骤,在该预处理中,各道的振幅用估计出的波传播中的衰减进行校正,接着进行所谓的“运动学”PsDM 处理,即偏移的权系数不考虑振幅的影响。最终图像中的振幅值仅来自于校正后叠前信号的贡献。

R. Baina 等的另一种处理方法是各道以一种保守的方式进行预处理,对它们的原始振幅尽可能地少做改动,然后把它们输入到保持振幅的 PsDM 算法(PAPsDM)中,此时偏移权系数是充分考虑了动态传播影响和采集因素影响的。

PAPsDM 基于渐近近似法(射线理论 + Kirchhoff 近似),可以在任意深度点将反射系数定量表示为偏移距的函数,即对任意偏移距 h ,有

$$R(x, h) \approx \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_{SL} \frac{J_{Kirch} \Delta S \Delta L}{A(s, x, r) |q(s, x, r)|} \delta' g_{obs}(r, T, s) \quad (1)$$

式中, ΔS 和 ΔL 分别为炮点之间和航线之间的距离,来自地震数据 δg_{obs} 。其他参数用三维动力学射线追踪来计算 $|q| = |p_s + p_r|$ (慢度向量 p_s 和 p_r 之和), $T = T(s, x, r)$ (震源 s 和检波器 r 之间)的旅行时, $A(s, x, r)$ 为振幅项,它考虑了几何扩展, J_{Kirch} 是 Beylkin 行列式, $J_{Kirch} = [q, \partial(q)/\partial(L), \partial(q)/\partial(S)]$, 用于校正由速度场引起的不规则射线照明(传播效应)或不规则数据分布(采集效应)。

图 3 是实际资料 PsDM 和 PAPsDM 的对比,PsDM 之前振幅校正的影响在叠前深度偏移叠加剖面上很明显。在偏移后的共偏移距资料上进行 AVA 反演得到流体线和截距剖面(图 4)。截距剖面上波至的连续性好于时间处理剖面或偏移叠加剖面,所以截距剖面可以用于构造解释。流体线上 AVA 异常的轮廓与伽马测井曲线反映的含气储层位置吻合。

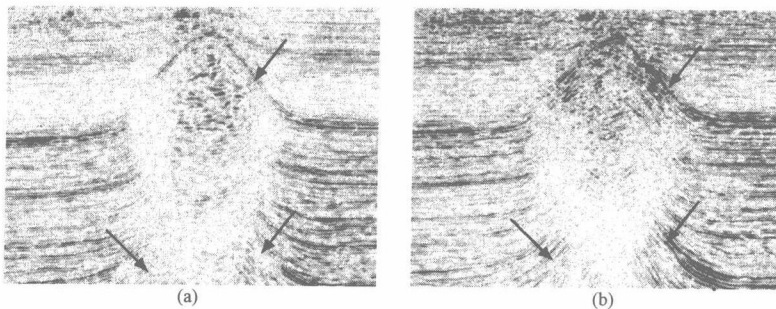


图 3 三维实际资料 PsDM(a)与 PAPsDM(b)的比较
可以看到在盐体的顶部和侧翼存在构造差异

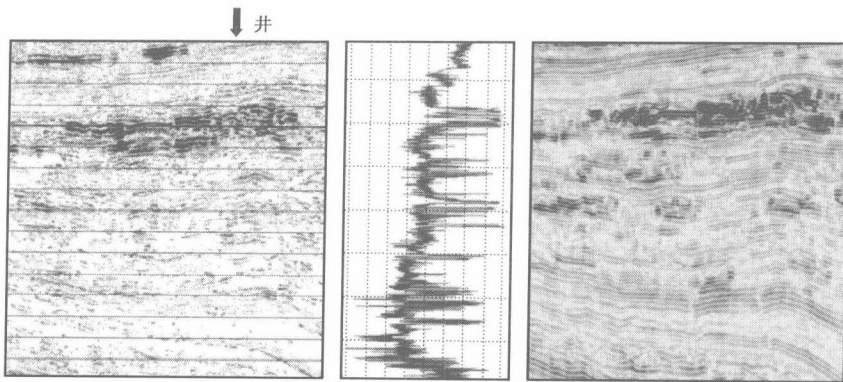


图4 从左到右,流体线剖面、伽马测井曲线和截距剖面
储层轮廓被AVA属性很好地刻画,测井曲线能与保振幅深度结果直接对比

因为简单的几何扩展校正不能重构和校正三维传播效应,从而可能破坏振幅变化甚至影响到构造信息,所以叠前资料在作PsDM之前必须进行十分仔细的预处理。为了进行准确的AVA分析,在PAPsDM核心中包含振幅计算是十分必要的。与非定量偏移叠加剖面相比,截距剖面能提供更多的信息。

3. AVO 属性反演

利用 Zoeppritz 方程的线性近似法可以估算弹性参数,如 Aki 和 Richards(1980)的文章中有公式

$$r(\theta) = \frac{1}{2}(1 - 4\gamma^2 \sin^2 \theta) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \frac{1}{\cos^2 \theta} - 4\gamma^2 \left(\frac{\Delta \beta}{\beta} \right) \sin^2 \theta \quad (2)$$

式中, r 为与角度有关的反射系数;参数 α 、 β 、 ρ 、 γ 分别为平均 P 波速度、S 波速度、密度和 S 波与 P 波速度比;变量 θ 为平均入射角; $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 、 $\Delta \rho$ 分别为 P 波速度、S 波速度和密度的改变量。

实践中,方程(1)很少用,因为对于常规采集几何结构和噪声水平来说,方程(2)是病态条件的。Jonathan E. Downton 等人以井控资料或岩石物理关系作为软约束条件,利用贝叶斯理论来进行 3 参数非线性 AVO 反演,这种软约束条件有助于解的稳定性。约束对解的影响程度取决于数据的信噪比水平和采集排列。在高信噪比数据和大角度范围的情况下,约束对解的影响较小,在这些条件下,可以可靠地求解密度反射系数。对于低信噪比数据或角度范围有限的情况,约束对解的影响大,参数估算具有很大的不确定性,必须要依靠质量控制来确定估算结果是否有用。

这些软约束条件对解的影响程度是数据的信噪比的函数,它们最好是根据局部井控资料计算得到。通过反演可以求解速度和密度反射系数,也可被用于计算其他的 AVO 属性。作为求解的一部分,反演还提供了参数不确定性的估算结果,用这种不确定性检验特殊 AVO 属性的可靠性。对于低噪声和大角度范围的数据,可以合理地估算密度反射系数。如果假定密度反射系数是 P 波速度反射系数的线性函数,那么,三项约束 AVO 反演的结果等效于 Smith 和 Gidlow 的 AVO 反演,类似地,如果密度反射系数为零,那么这种三项约束反演结果等效于二项 Fatti 方程的反演结果。如果速度反射系数为零,那么这种三项约束反演等效于具有先验约束的二项 Shuey 方程。通过选择局部井控制的约束条件、已知的岩石物理关系和数据质量

的约束加权,约束三参数 AVO 反演的结果比其他方法具有更高的精度。

Michael C. Kelly 等人则提出了非线性 AVO 方程并将其用于三参数反演的方法。这种近似方法要比线性方程更为精确。他们提出的非线性方程是将方程精确扩展到岩石特性差异中二阶的结果。与其他精确方程的近似方法不同,该方法无明显的小角度假设,利用了射线参数 p 或其他相关的小角度参数,其结果方程要比线性方程更为精确,尤其是在大反射界面上下岩石特性差异大和大入射角的情况下。基于这种非线性方程的反演提供了更为精确和更为稳定的结果,并且允许在反演中利用对应于特大角度的振幅。

对多数陆上地震资料而言,AVO 反演的输入是经过 NMO 的地震道集。NMO 是一种运动学校正,它使振幅和相位随偏移距的增大而发生畸变,从而对 AVO 反演产生负面影响。这个问题随着用于 AVO 反演的最大入射角的增大而愈加明显。NMO 拉伸就是一种由 NMO 处理引入的振幅畸变,依赖于偏移距的调谐是另一种形式的振幅畸变。前人提出了一些方法来解决这些问题,如 Ursin 和 Ekren 提出在特定的同相轴进行 CDP 道集拉平处理而不进行 NMO 处理等。Downton 和 Lines 提出了一种在适当的井控或经验岩石物理关系约束下同时进行 AVO 和 NMO 反演的方法,可以部分解决这些问题。Downton 和 Lines 提出的 AVO NMO 反演算法以常规模型为基础。假设地球是由一系列均匀各向同性水平层构成,反射系数随偏移距的变化用 Zoeppritz 方程的线性近似式来模拟,射线追踪则用于建立入射角和偏移距之间的关系。算法中不考虑透射损失,以及转换波和多次波。通过数学演算,可以得到一个线性方程组。由于 AVO 问题一般是超定的,而 NMO 是欠定的,所以线性方程组是不确定的,其逆可能是病态的,为此需要引入一些约束条件,使问题可解。合成资料试验表明,同时 AVO NMO 反演给出的结果好于先进行 NMO,然后进行 AVO 反演的传统方法。

4. 流体因子

估计流体因子的标准方法的缺陷在于截距和梯度是统计相关的。但由于统计相关性与预期的岩性相关性极其相似,所以人们往往难以识别该缺陷。其结果是,估计出的流体因子仅是远角度的叠加。G. Cambois 提出了一种没有横波测井资料约束时,流体因子计算的新方法,该方法利用不相关的近角度和远角度叠加来计算流体因子。实际上,从地震资料中提取流体因子有两种方法,第一种方法是从井信息中计算理论背景值,并用最小匹配原则将其从数据中去除。第二种方法是直接从地震资料中计算背景值。尽管从地震资料导出的背景值与岩性参数无关,但由于它能获得更有意义的结果,所以第二种方法已经成为首选方法。对小入射角 θ ,地震资料可以用

$$d_i = A + B \sin^2 \theta_i \quad (3)$$

来模拟。式中 A 和 B 分别是截距和梯度,它们与 P 波和 S 波速度及密度有关。在含水碎屑地层中,这 3 个弹性参数一般服从代数关系。因此,可以导出一个线性关系,使 A, B 与“背景”含水水泥岩和砂岩联系起来。在 v_P/v_S 近似等于 2 时, $A + B = 0$,此时,式(3)可以改写为

$$d_i = A \cos^2 \theta_i + (A + B) \sin^2 \theta_i = A \cos^2 \theta_i + PR \sin^2 \theta_i \quad (4)$$

式中, PR 称为 Poisson's 反射系数。在碎屑地层中,背景是含水水泥岩和砂岩,对应于式(4)中第一项。第二项是资料与背景之间的差,按定义即为流体因子。定义 Ω ,使得

$$\sin^2 \Omega = \frac{\sum \sin^4 \theta_i}{\sum \sin^2 \theta_i} \quad (5)$$