

反演技术

<http://www.petrosoftware.cn>

石油软件技术论坛

前言

- 一. 反演的概念、目的
- 二. 反演的发展历史及趋势
- 三. 反演的基本方法
- 四. 地震反演难题的解决方案
- 五. 反演的实质
- 六. 反演的基本流程
- 七. AVO 反演处理简介

前言

地震、测井、钻井是石油工作者认识地下地质构造、地层、岩性、物性、含油气性的最重要的信息来源。虽然测井、钻井仅能提供井孔附近的有关信息，尤其是有关岩性、物性、含油气性的信息，但是这些信息往往具有很高的分辨率，可信度、准确性，能确切地指出含油气层的位置，定量化分析与储层、油藏有关的参数。然而一个油气田勘探、开发方案的设计、实施、调整仅靠测井、钻井资料是远远不够的，必须与地震资料相结合进行综合分析才能取得良好效果。

地震资料的分辨率虽然远远不及测井、钻井，但是随着地震勘探技术的发展，从光电记录、模拟记录到数字记录，从二维到三维，地震资料的信噪比、分辨率、成像的准确性都获得了极大的提高，由于地震资料包含大量地下地质信息，覆盖面积广，具有三维特性，所以这项技术的使用越来越受到石油工作者的重视，如何利用地震资料研究地下地质构造、地层？如何进行储层预测、油藏描述？如何进行油藏、含油气层的预测？

这些问题促使地球物理学家、地质学家开发应用了一系列地震资料特殊处理技术，如地震资料反演技术、地震属性分析技术、AVO分析技术，这些技术充分利用测井、钻井、地震的长处，使人们对地下储层、油藏的研究从点到面、从二维到三维、从三维可视化研究到油藏动态监测、从定性研究到定量化研究，大大提高了钻探成功率，有效地指导了油田开发，为提高油田最终采收率起到了积极的作用，因此地震技术被列为二十一世纪石油工业发展的首要技术，相信地震资料特殊处理技术（地震资料反演技术、地震属性分析技术、AVO分析技术）也必将在我国油田勘探、开发中起到越来越重要的作用。

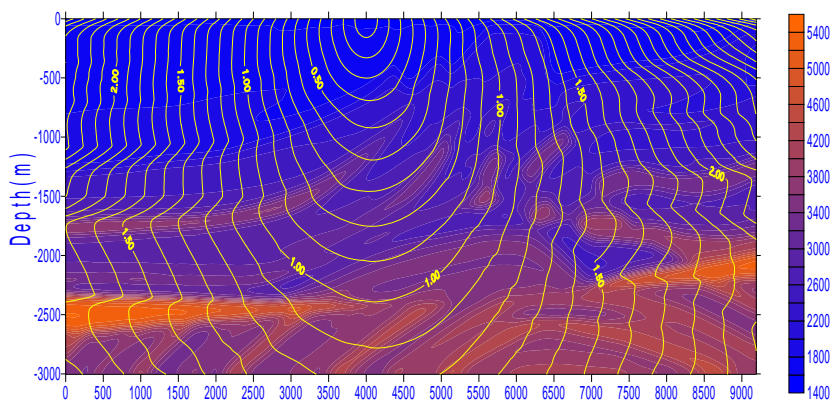
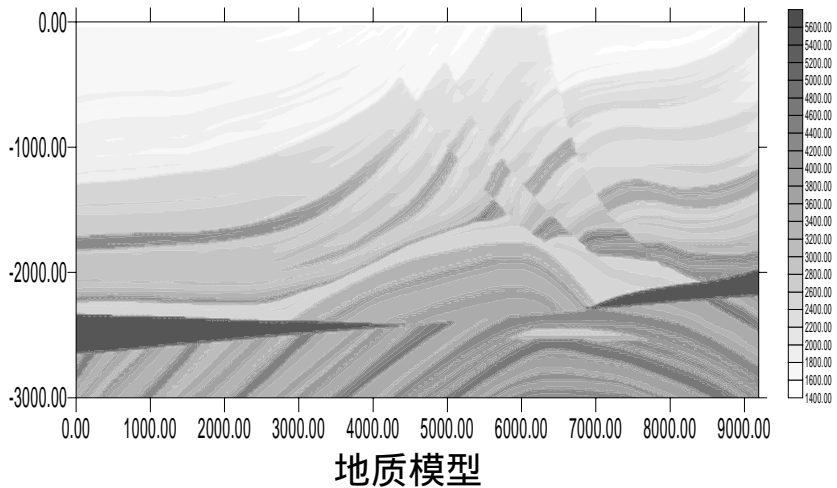
一．反演的概念、目的

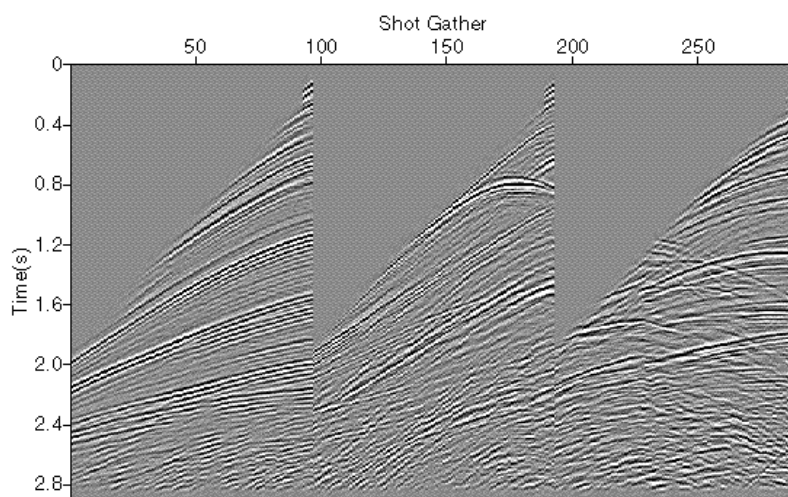
地震资料反演技术就是充分利用测井、钻井、地质资料提供的丰富的构造、层位、岩性等信息，从常规的地震剖面推导出地下地层的波阻抗、密度、速度、孔隙度、渗透率、沙泥岩百分比、压力等信息。

那么如何理解这个概念？还是让我们看看什么是正演吧！

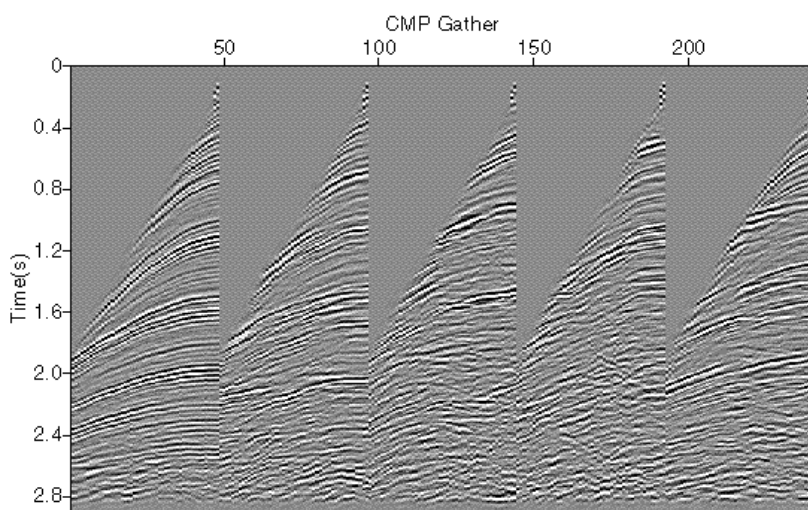
1.正演的概念

如果我们已知地下的地质模型,它的地震响应如何？通过模拟野外地震采集,得到单炮记录,再通过速度分析、动校正、叠加、偏移得到合成剖面这一过程就是正演。

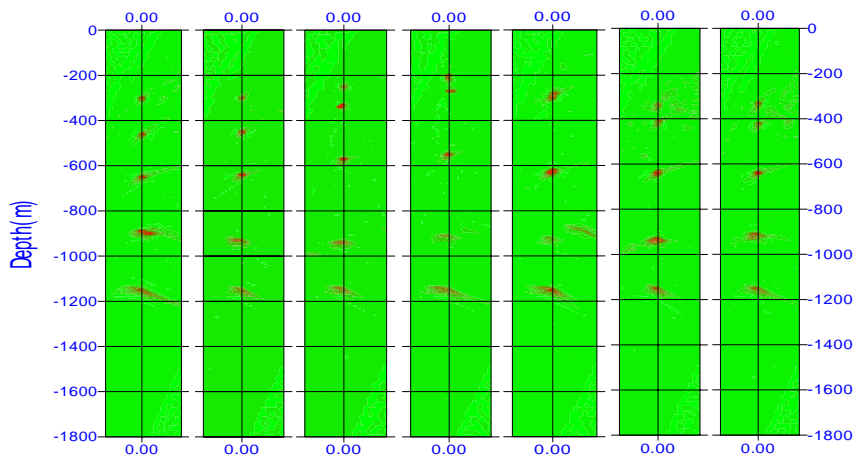




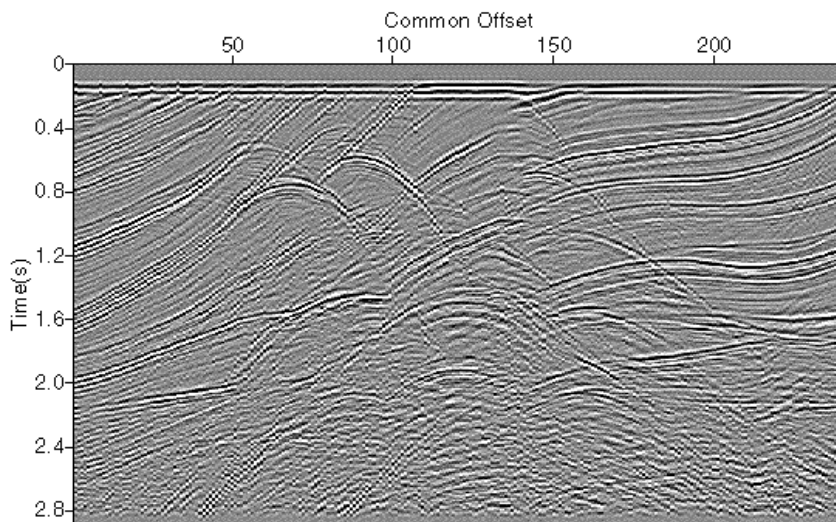
单炮记录



CMP 道集记录



速度分析



叠加剖面

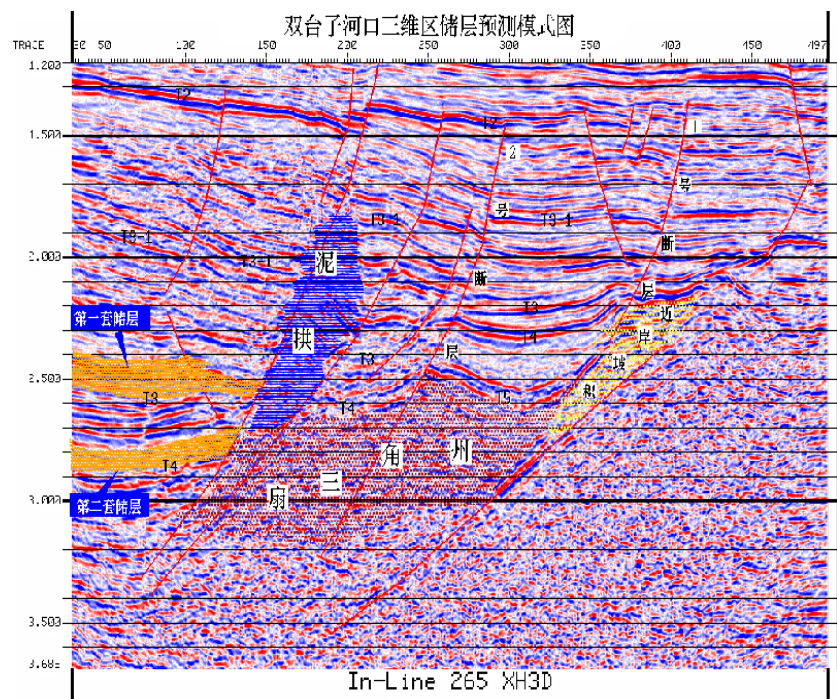
2. 反演的概念

了解了正演的概念，反演就好理解了。地震剖面代表了什么？地震剖面的同相轴实质上代表的是反射系数，同相轴追踪着反射系数而不是砂岩地层，只有转换成波阻抗，才能真实地反应砂层的变化。

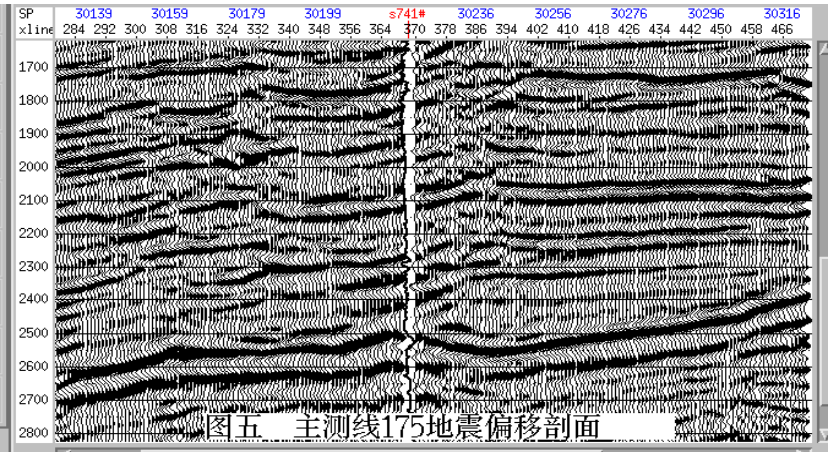
地震资料反演可分为两部分：

- (1) .通过有井(绝对)、无井(相对)波阻抗反演得到波阻抗、速度数据体。
- (2) 利用测井、测试资料结合波阻抗、速度数据进行岩性反演，得

到孔隙度、渗透率、砂泥百分比、压力等数据。
反演就是由地震数据得到地质模型，进行储层、油藏研究。

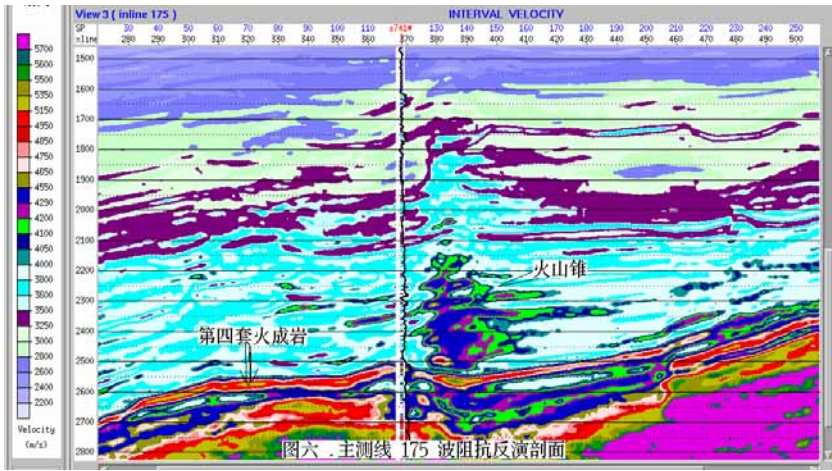


常规地震剖面构造、岩性解释



特殊岩性体地震剖面

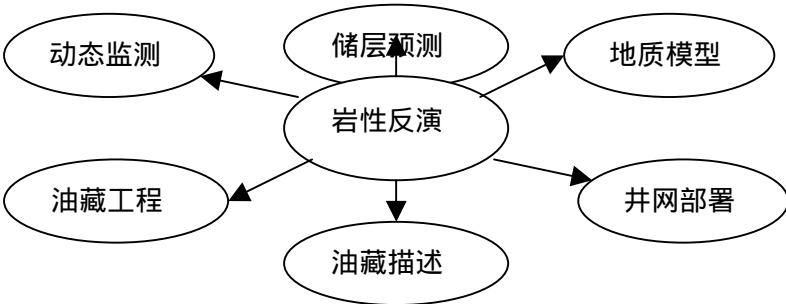
上图是包括火山锥、火山溢流相的特殊岩性体地震剖面，从常规剖面上地质工作者很难进行岩性体的解释和追踪。下图是常规剖面和反演剖面对比，从图中可以看出反演剖面更有利于地质体的解释、识别、和横向追踪。



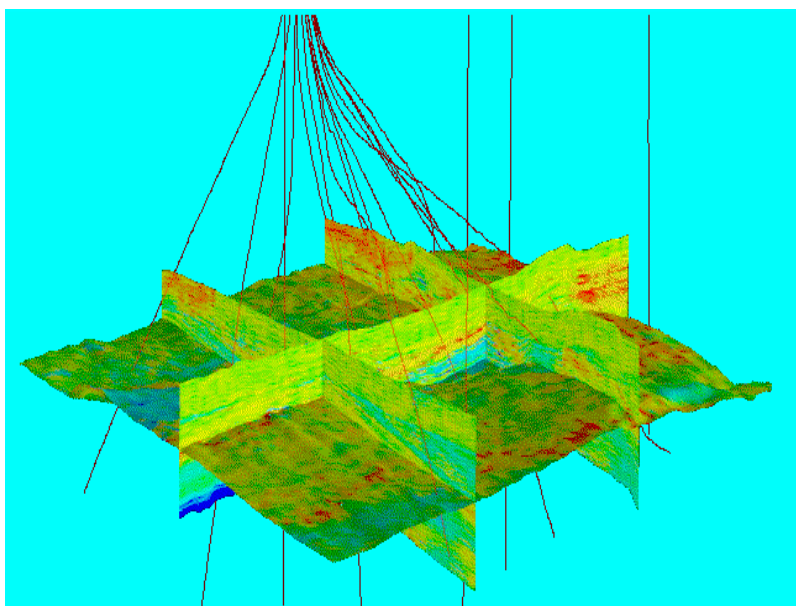
常规剖面与反演剖面对比

3 反演的目的

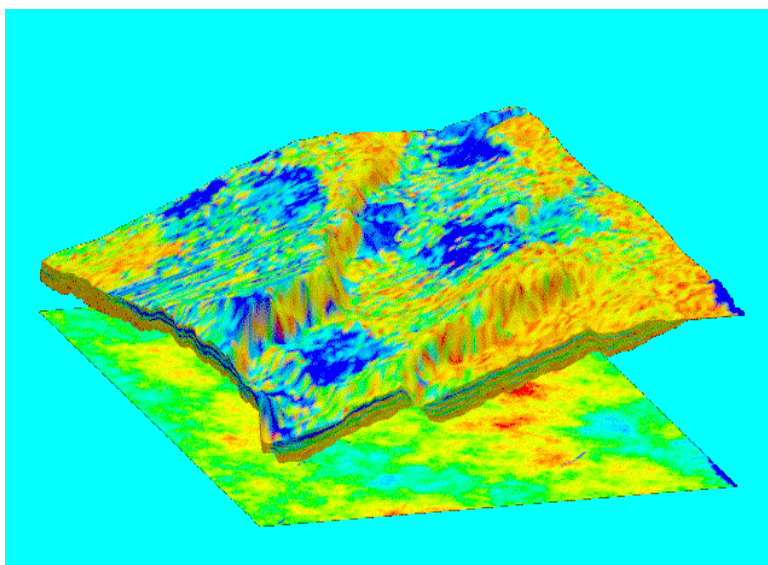
反演提供各种岩性剖面，目的就是将已知井点信息与地震资料相结合，为油田工作者提供更多的地下地质信息，建立储层、油藏的概念模型、静态模型、预测模型，提高油田采收率。下面几张图反映了井点与反演结果的空间结构关系。体现了只有通过地震资料反演，才使储层、油藏的空间定量化研究成为可能。



反演与油藏研究关系图



钻井+反演储层、油藏研究



利用反演结果进行油藏可视化研究

二. 反演发展历史及趋势

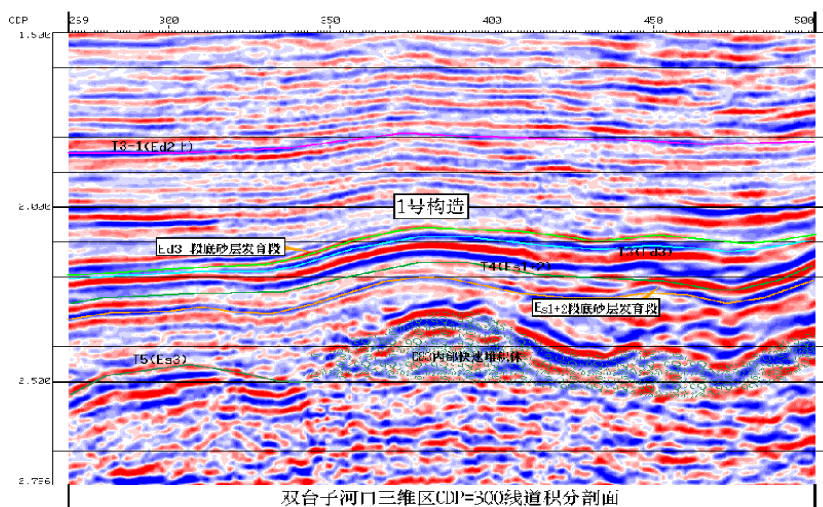
1. 反演的发展历史

地震勘探技术经历了模拟技术、数字技术、多次覆盖技术、三维地震技术一次又一次地飞跃,在油气勘探中的作用越来越大。目前正在向开发地震技术发展,在油气田开发中也将起到重要作用。特别是“三高一准”(高信噪比、高保真度、高分辨率和准确成像)地震技术的发展使它的精度大幅度提高,已经逐步从做简单的构造图,扩展到进行地层、沉积、构造、储层物性、生油层评价和超压预测等研究,进而到油气藏流体研究和油藏动态监测。

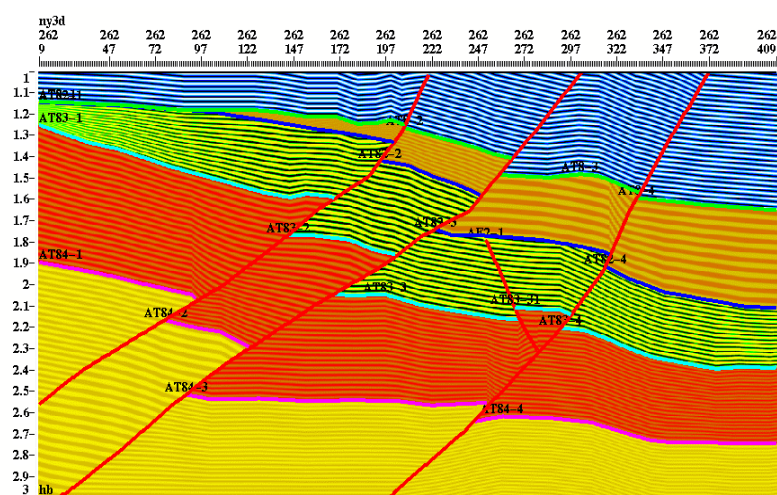
如何利用地震资料进行油藏定量化研究?地震资料所包含的信息(振幅、频率、相位、速度、吸收、反射结构等)与岩性、物性、含油气性有何关系?

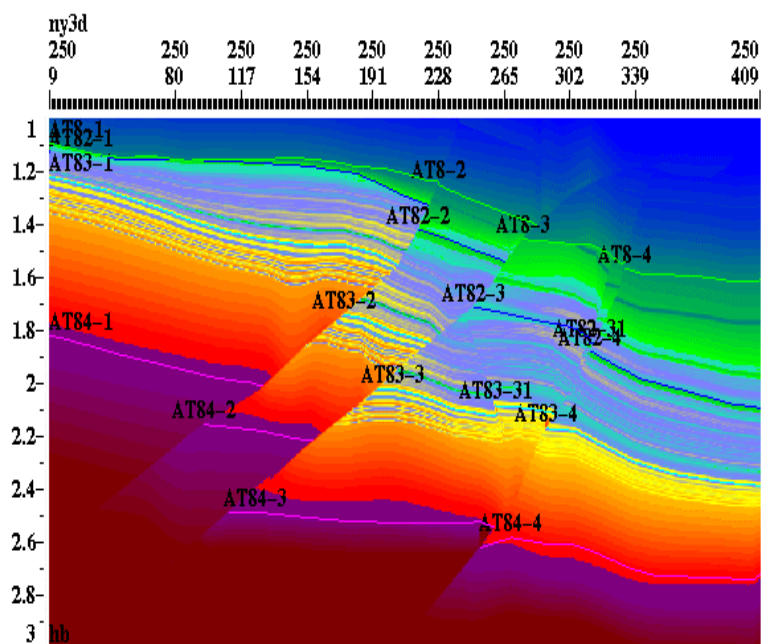
这些问题一直是物探工作者努力探索、研究的焦点,主要可以分为以下几个阶段:

1. 六十年代后期:用地震速度计算砂泥岩含量。
2. 七十年代早期:亮点技术的应用。
3. 七十年代中期:声阻抗技术应用初期。主要方法是反射系数求和法、反射函数积分法和波阻抗递推法等。
4. 七十年代后期:纵横波勘探兴起,亮点、声阻抗技术广泛应用。
5. 八十年代早期:AVO分析技术开始应用,声阻抗技术中的稀疏脉冲法、以模型为基础的方法也已出现并得到应用和迅速推广。
6. 九十年代:多波勘探、层析成像、井间地震、高分辨率地震采集、处理技术等新技术不断涌现,地震反演技术也得到迅速发展,声阻抗、岩性反演与地质统计学、模型正反演相互融合使反演多解性问题得到较为妥善解决。

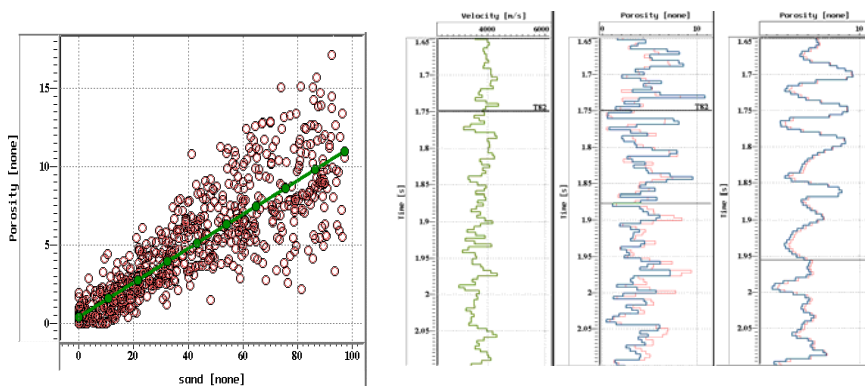


利用道积分剖面进行岩性解释





多井约束构建参数模型



测井、反演资料对比分析

2. 反演的发展趋势

地震资料反演技术目前正由叠后到叠前、叠前、叠后相结合，由单一的波阻抗反演到利用地质统计学、分形分维、神经网络等技术与测井、测试、钻井、地质综合研究相结合，由单一的资料反演到正、

反演相结合，储层建模、约束反演、油藏数值模拟相互验证，其目的就是要通过多约束条件解决反演多解性，提供准确结果为油田的勘探、开发服务。

三. 反演的基本方法

当今的地震反演方法，一是建立在波动理论基础之上的。由其固有的不稳定性，反演的效果尚不如以褶积模型为基础的方法，加之这种方法尚不够完善而未能得到普遍推广。二是建立在褶积模型基础上的，即叠后资料反演,Brain.h.Russell将其分为三类，即：

1. 带限反演，或称常规递推法。

地震资料实际上是地震子波与反射系数的褶积。

$$S(t) = R(t) * W(t)$$

$S(t)$ 地震纪录

$R(t)$ 反射系数

$W(t)$ 子波

反射系数：

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

当波阻抗反差不大时，

$$\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1 = \Delta \rho V$$

则有：

$$R \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho V}{\rho V}$$

因此反射系数取积分便近似有：

所以反
射系数的积
分正比于波
阻抗的自然

$$\int R dt \approx \frac{1}{2} \int \frac{\Delta \rho V}{\rho V} = \frac{1}{2} \ln \rho V$$

对数，这是一种最简单的波阻抗概念，我们通常称之为道积分（相对波阻抗方法）。美国某家石油公司在墨西哥湾海上寻找非背斜油藏，一直取得成功。其成功诀窍有三：亮点、积分地震道和AVO技术。

积分地震道的优点是：

（1）递推时累计误差小；

- (2) 计算简单，不需要反射系数的标定；
- (3) 没有井的控制也能作。

缺点是它不知道波阻抗的绝对值。

常规递推法的绝对波阻抗反演通常分两步：

- (1) 令时刻 t_n 时波阻抗为 Z_n ，时刻 t_{n+1} 时的波阻抗为 Z_{n+1}
- 递推公式为：

$$Z_{n+1} = Z_0 \prod_{n=0}^n \frac{1+R_n}{1-R_n}$$

显然，如果利用测井资料已知波阻抗初始值 Z_0 ，则可利用上式依次推算出任意时刻的波阻抗。大家知道，在野外记录时，由于受接收仪器的频率特性影响，在记录中基本不含低于6-8Hz的频率分量。此时的波阻抗为相对波阻抗。

(2) 利用地震速度场或测井资料建模速度场通过滤波仅保留其低频成分，把所得到的低频成分加到相对波阻抗曲线上，就可得到可用于储层定量计算和油藏描述的绝对波阻抗。

2. 稀疏脉冲法，包括最大似然反褶积、L1范数反褶积、最小熵反褶积、最大熵反褶积、同态反褶积等，稀疏脉冲反演是基于脉冲反褶积基础上的递推反演方法，其基本假设是地层的强反射系数是稀疏分布的。从地震道中根据稀疏的原则提取反射系数，与子波褶积后生成合成地震记录；利用合成地震记录与原始地震道残差的大小修改参与褶积的反射系数个数，再作合成地震记录；如此迭代，最终得到一个能最佳逼近原始地震道的反射系数序列。该方法适用于井数较少的地区，其主要优点是能够获得宽频带的反射系数，较好地解决地震反演的多解性问题，从而使反演结果更趋于真实。

约束稀疏脉冲反演采用一个快速的趋势约束脉冲反演算法，用解释层位和井约束控制波阻抗的趋势和幅值范围，脉冲算法产生了宽带结果，恢复了缺失的低频和低频成分；同时，再加入根据井的波阻抗的趋势约束。约束稀疏脉冲反演最小误差函数是

$$J = \sum_i (r_i)^p + \sum_i (d_i - s_i)^q + \sum_i (t_i - Z_i)^2 \quad (1)$$

式中: r_i 为样点的反射系数; z_i 为样点的波阻抗; d_i 是原始地震道; s_i 是合成地震道; Z_i 介于井约束的最大和最小波阻抗之间; t_i 是用户提供的波阻抗趋势; w_i 为趋势最小匹配加权因子; p, q 为L模因子; i 是地震道样点序号; λ_i 为数据不匹配加权因子。

如果从最大似然反褶积中求反射系数 $r(t)$, 则在上述过程中为了得到可靠的反射系数估计值, 可以单独输入波阻抗信息作为约束条件, 从而求得最合理的波阻抗模型

$$Z(t) = Z(t-1) (1+r(t)) / (1-r(t)) \quad (2)$$

稀疏脉冲法假设反射系数是稀疏的、离散的, 利用测井资料可以得到井旁道的准确反射系数, 通过上述反褶积方法, 在测井资料、地质模型的约束下, 逐道递推子波、反射系数, 从而反演出波阻抗、速度等数据。

常规递推法与稀疏脉冲反演法主要是利用反褶积方法来恢复反射系数序列, 由经过标定的反射系数序列递推出相对波阻抗, 然后加上从声波测井和地质模型中得到的低频分量, 最终得到反演波阻抗。这两类方法的主要缺陷是选择可靠低频信息较为困难, 由反射系数递推波阻抗过程中误差积累快, 当反射系数存在较大误差时, 递推出来的波阻抗剖面会面貌全非。

此外, 经过反褶积处理的结果, 并不代表真正的反射系数序列, 稀疏脉冲法在地质结构复杂的条件下使用效果很差。其精度也难以满足储层预测、油藏描述的需要。

2. 以模型为基础的反演方法。如地震岩性模拟、广义线性反演、宽带约束反演等。

基于模型反演的基本原理是: 假设一个 N 层地层模型, 各层厚

度、速度、密度参数分别为 $d(i)$ 、 $v(i)$ 、 $\rho(i)$ ($i=1, 2, 3, \dots, N$), 地震波在各层垂直传播时间为 $t(i)=2d(i)/v(i)$, 则第 i 层底部的反射时间为 $t(i)=t(j) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$ 其地震褶积模型为 $M(i)=r(j)w[i-(j)+1] \quad i=1, 2, \dots, N_s \quad (4)$

定义目标函数：

$$o(m) = \|D - F\|_p + W_I \|M_I - M_I^{pri}\| + W_C \|\nabla_x M_I - \nabla_x M_I^{pri}\|_p$$

第一项：记录残差，要使反演结果的模型响应(F)尽可能逼近实际记录(D)

第二项：先验约束，即反演结果不能偏离先验值太远

第三项：是要保证反演结果具有一定的横向连续性，使解更合理

D : 实际地震记录

∇_x : 横向梯度

F : 合成地震记录

W_I : 波阻抗模型先验值的约束权系数

M_I : 波阻抗模型参数

W_C : 波阻抗横向连续性的约束权系数

M_I^{pri} : 波阻抗模型参数的先验值

$\|\cdot\|_p$: L_p 模

这种反演方法采用最优化算法，迭代速度与稳定性都很好，克服了波阻抗的相对和绝对标度在递推反演中的缺陷，改善了波阻抗界面的分辨率，消除了子波的剩余效应所造成的畸变，受地震资料带限性质的影响小，提高了反演结果的可信度。

以模型为基础的反演方法以测井资料为约束条件，采用正、反演结合进行迭代，求取地下波阻抗将反演方法推向非线性问题。这种新方法利用了测井资料的高频和低频信息，大幅度拓宽了地震信号的频带，可以更好地获得薄层、薄互层的波阻抗信息。因而表现出强劲的发展势头，是目前国内外各软件公司重点发展的技术，也是油田开发阶段进行储层预测、油藏描述的主要应用技术。

以模型为基础的反演主要分三个阶段进行：

(1) 首先应综合地震、测井和地质等资料得到的波阻抗曲线、层位解释结果和岩性信息，确定一个初始波阻抗模型。这个初始模型把应用地质知识解释的层位、断层和岩性信息反馈到反演中去。

(2) 把地震道的估计结果与实际地震道相比，得到剩余误差值。利用这个误差，通过随机算法（或模拟退火、神经网络、遗传算法等非线性全局最优化方法），在噪声和模型协方差估计值得约束下，迭代

修改模型，直到获得一个可以接受的剩余误差为止。最终控制反演过程的稳定性与分辨率，进而处理出高质量的波阻抗剖面。

(3) 利用测井岩性、物性、波阻抗反演结果采用拟和、地质统计学(克里金、协克里金)方法求取相关关系，进行岩性反演。

目前国内外反演软件众多，多以国外软件为主。在我国较有影响的软件有以下几家：

(1) jason反演软件，该软件从软件设计上充分考虑了勘探、开发不同阶段的资料情况，有较完善的建模软件(SeiRIS、EarthModel、VelMod)，子波分析软件(Wavelets)，反演方法主要有Invertrace(基于道反演技术，包括常规递推反演、约束稀疏脉冲反演、道合并和孔隙度估算)，InverMod(基于模型参数反演技术可以反演在时间和深度域里与测井分辨

率相同的模型)，StatMod(地质统计学和随机模拟、随机反演技术可以精细描述油藏非均质性特征)。

(2) EPS的优势：

- 全三维建模和反演，确保反演结果空间闭合。
- 融合地质、测井、地震等多元地学信息到同一模型。
- 采用遗传算法(GA)和模拟退火(SA)全局寻优的非线性反演方法比较成功的解决了地震反演所面临的数据和模型之间高度非线性及目标函数具有多个极小值问题。
- 提高反演的信息使用量、信息匹配精度和反演结果的置信度。

(3) Strata反演软件，该软件使用简便但在模型控制方面不如jason软件，反演方法主要有常规递推反演、宽带约束反演、稀疏脉冲反演。

(4) RM反演软件，是Schlumberger(斯伦贝谢)GeoQuest软件的储层预测及油藏描述软件，该软件主要以常规递推反演为主，今年可能推出以模型为基础的反演。

(5) ISIS反演软件，属于模型技术的反演方法，针对基于模型技术的反演方法所存在的多解性问题，它利用波阻抗垂向变化、水平连续性、信噪比、反演结果和低频模型的偏差，用一个反演的概率空间来限制多解性。该方法是正、反演相结合的方法，类似于西方地球物理公司的SLIM(地震岩性反演)，缺点是分辨率难以满足开发的需要，

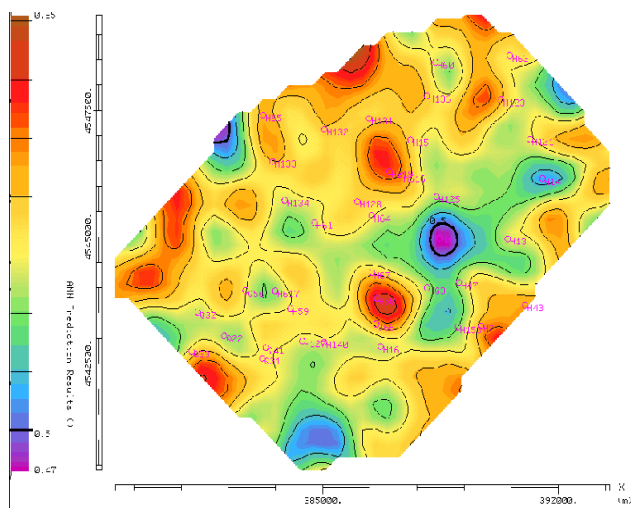
但在勘探阶段还是较好的方法。

(6) InterWell综合测井与地质约束三维多道地震地层岩性反演,该软件在我国还未多见,方法上类似于jason的InverMod。

(7)西方地球物理公司的PAIT、PIVT、SLIM、LithoSeis等反演软件,该软件这些年基本没多大发展,基本还处于带限反演、稀疏脉冲反演阶段。

其他的反演软件还有很多,如很多地震资料处理软件都含有反演方面的程序,但相比前面所说的几家软件从使用、效果、方法以及商业化程度上都无明显优势,因此在生产中还应用较少。

反演的方法、软件众多,正如前文所述最终结果必须能解决储层、油藏研究的问题,从下面几张图可以看出,测井、地质、物探、钻井、油藏工程人员必须紧密结合,合理、准确、适当的应用反演资料。



利用反演结果预测含油气性图

JASON与STRATA反演软件对比表 表5-1

	JASON	STRATA
优点	1、具有合理的单井地震地质模型建立方法和多种质量控制手段 2、具有强大的初始模型建模功能（较精确），对断层处理效果好 3、在横向上具有较好的可靠性	1、在纵向上具有较高的分辨率和信噪比 2、和井的吻合程度较高 3、识别薄砂层的能力较强 4、反演处理速度较快
缺点	1、在井数较少时纵向上的分辨率较低 2、反演处理速度较慢	1、标定过程中可随意修改原始测井曲线 2、横向上分辨率的可靠程度不一致 3、对断层处理效果差

四、地震反演难题的解决方案

- 计算量和数据量非常庞大

--基于延迟脉冲模型的快速算法。

- 数据和模型之间高度非线性

--模拟退火非线性反演方法。

- 目标函数具有多个极小值

--模拟退火全局最优的反演方法。

- 具有多解性

--复杂地质建模技术 ,实现多元地学信息 在模型空间的有机融合，提高反演的信息使用量。

五、反演的实质

从地震道中消去子波的影响而达到反射系数序列，势必存在多解性问题，目前的方法除了递推反演之外在某种程度上都是基于模型的约束反演，区别只在于如何平衡非地震信息的约束作用和如何拓宽频率。

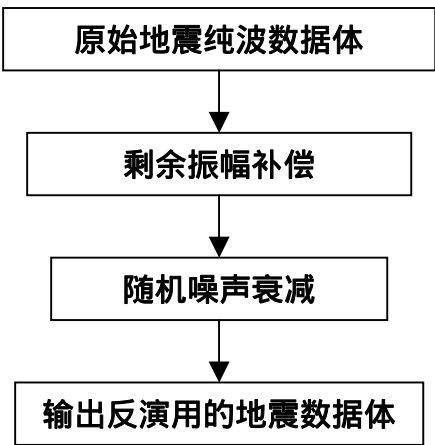
任何反演都存在多解性的困扰，对地球物理反演来说，增加合理的地质约束是多解性中的最优解，是地质含义上的惟一解。

六、反演的基本流程

目前的常见地震资料反演处理流程主要可以分为两部分：

1. 前处理

用于反演的地震资料要求是高保真的地震资料，通常需要在提供的保幅叠偏地震数据基础上进行必要的提高分辨率、信噪比处理，流程如下：



叠后地震资料处理流程

2. 反演处理

通过前处理，认真分析反演工区的地质特点、地震资料品质、进行测井曲线的归一化处理之后，反演处理流程如下：

原始地震成果数据



叠后提高信噪比和分辨率保幅处理



解释成果输入



合成记录标定



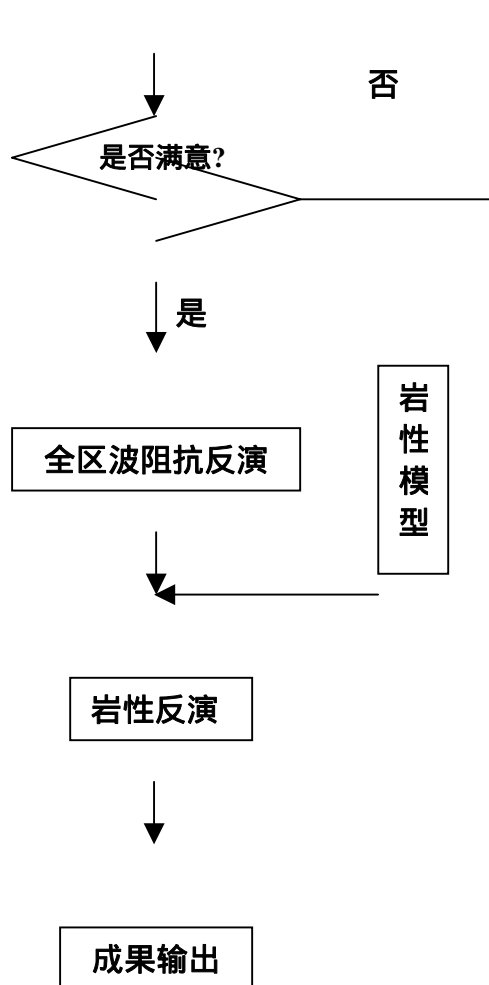
子波分析及提



低频模型构造



主要过井剖面预反演



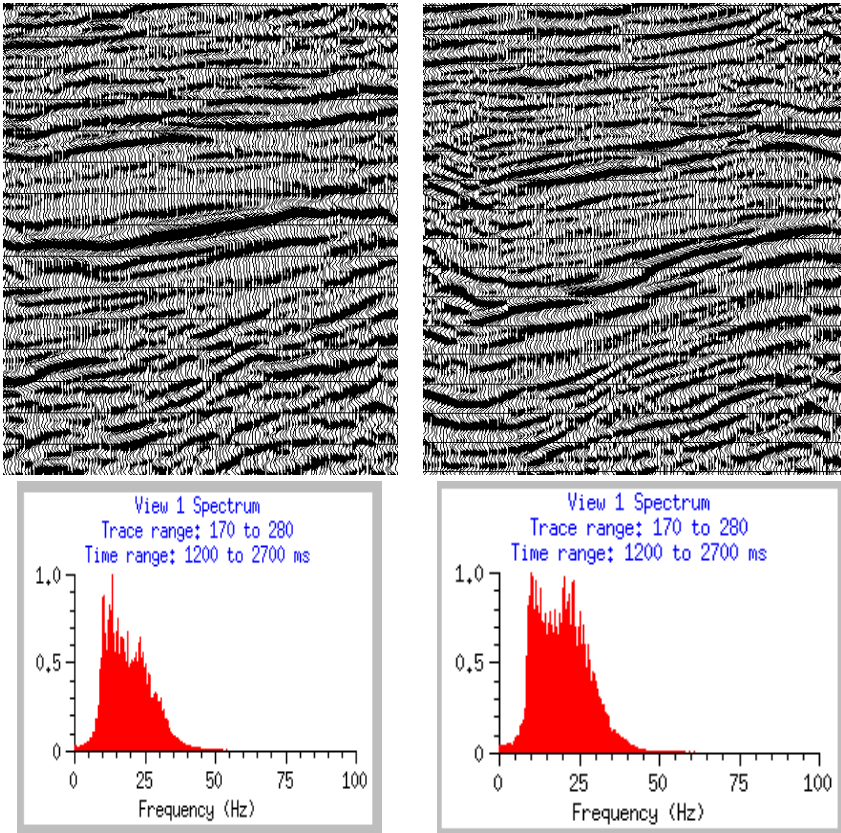
常规反演流程

五、反演的质量控制因素

地震资料反演结果的精度从反演的方法上来看不难想象，不论是带限反演、稀疏脉冲反演、基于模型的反演，还是目前还未广泛推广的波动方程反演大致主要受以下几个方面的限制：

(1) 地震资料本身的限制，用于反演的地震资料必须是高保真度资料，如果资料本身不是保持振幅处理的，那么在进行反演时，所

得到的波阻抗就反映不了地下地层的信息，也就根本就不能用于储层预测和油藏描述。此外，地震资料还应尽量高信噪比、高分辨率、准确成像，这些都将影响反演的分辨率，一句话，地震资料的品质将最终影响反演的分辨率。



资料品质分析

(2) 用于反演的测井资料品质，在进行反演前必须对工区内参加反演的测井曲线进行环境校正，进行全区曲线的归一化处理。如果测井曲线没有进行环境校正，归一化处理，在反演时同样也反映不了地下地层的地质信息。

(3) 子波的提取，以褶积模型为基础的反演方法需要子波来进行反射系数的提取，如何估算子波？怎样提取的子波才更适合于反演？才能得到准确的反射系数？目前提取子波的方法主要是从地震、测井或两者综合。

(4) 合成记录的标定。子波提取的好坏、地震资料极性的判别都需

要用合成记录来判断。标定的结果将影响低频分量及反射系数的对应关系，最终影响波阻抗反演结果。

（5）地质模型的构建。反演的地震资料必须进行精细的层位、断层解释建立合理的地质模型，用于约束反演和提供低频分量。

（6）反演方法的选择。在不同的勘探、开发阶段我们所掌握的资料信息程度不同，采用的方法也应有所不同。在勘探阶段主要应用道积分、递归反演、稀疏脉冲反演。开发阶段主要采用基于模型的反演，正、反演相结合迭代进行。勘探阶段的岩性反演主要采用统计公式转换，而开发阶段则主要利用地质统计学方法进行随机建模、随机反演

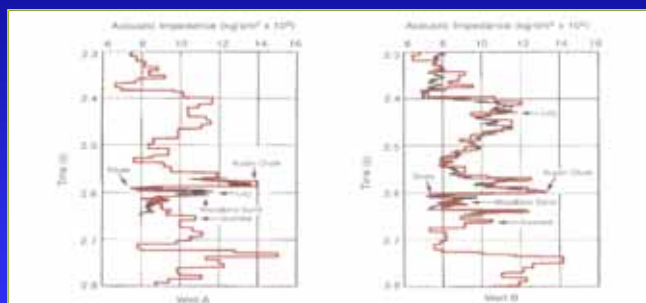
七、AVO 反演处理简介

随着地球物理技术的飞速发展及利用地震信息进行岩性勘探与含油气储层的研究，直接利用地震信息找油找气成为人们普遍关注的热点，亮点技术的出现，为直接找油、找气揭示了广阔的前景；同时真假亮点想象使人们陷入勘探的误区，如何识别真假亮点，即如何从亮点的振幅异常中识别出只与含气有关的亮点，多年来人们渴望找到一种方法来解决这一问题，八十年代 AVO 技术的出现，对解决这一问题有了可能。近年来 AVO 技术日趋成熟，在国外 AVO 烃类检测技术的广泛应用，为油气田的开发带来了巨大的经济效益。Zoeppritz 方程描述了振幅与入射角的关系。精确的 Zoeppritz 方程是 AVO 烃类检测技术的基础。

地震反射信号的振幅随炮检距的变化而变化。反射系数对反射角度的依赖关系反映了这种变化，在某些沉积环境中，这种振幅变化可能提供了烃类存在的重要信息，通常共中心点叠加压制了振幅随入射角变化的信息，因为叠加中每个同相轴的振幅表示所有不同炮检距上地震反射波的平均振幅。AVO 分析处理技术试图研究振幅随入射角的变化关系，研究这种关系的变化，对储层的含油气性进行预测，特别适合于预测含气储层。求得的 AVO 属性以适当的方式显示，并对其进行解释、研究，找出区域上油气的分布规律。

地震反演研究进展

-- 遗传算法和模拟退火反演方法



基于遗传算法叠前反演 (Mallick等, 1999)
反演波阻抗与井中波阻抗吻合很好

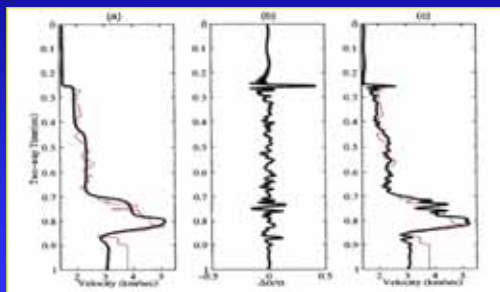
地震反演研究进展

--分步反演方法

- 采用分步反演提高叠前地震波形反演的速度和稳定性。
- 用VFSA旅行时反演估算背景速度
- 用线性反演估算波阻抗的扰动量
- 联合第一和第二步的结果构建初始模型，用VFSA叠前地震波形反演弹性参数

地震反演研究进展

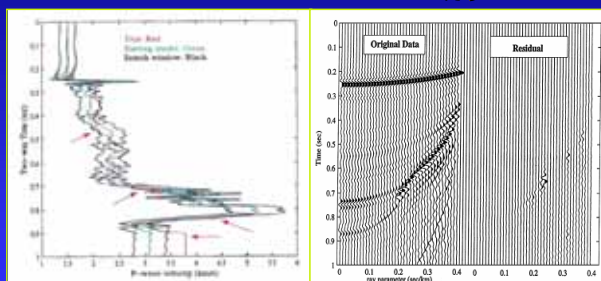
--分步反演方法



分步反演反演结果 (Xia 等, 1998), 红线表示实际值。
(a)、(b)、(c) 分别表示背景速度、速度的扰动量、
联合 (a) 和 (b) 构建的初始模型

地震反演研究进展

--分步反演方法



分步反演反演结果 (Xia 等, 1998), 红线表示实际值。左图表示构建的初始模型和模型搜索空间。右图展示了原始数据和叠前地震全波反演误差数据, 误差是很小的。

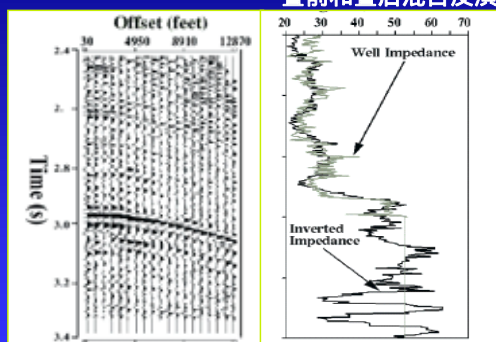
地震反演研究进展

- 叠前和叠后混合反演方法

叠前和叠后混合反演方法。首先在一些控制点进行精细的叠前地震波形反演构建虚拟井曲线, 然后以虚拟井作为控制信息进行叠后反演。叠前和叠后混合反演方法利用了叠前反演分辨率高, 叠后反演速度快、稳定性好的优点, 克服了各自的缺点, 成为目前的一个研究亮点。特别对于深海无井的情况, 具有很大的应用前景。

地震反演研究进展

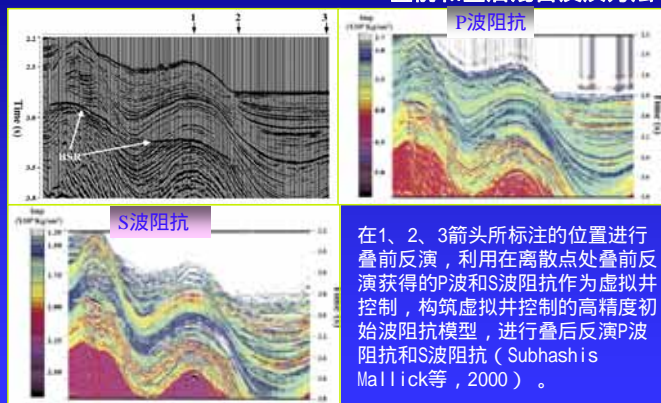
--叠前和叠后混合反演方法



基于遗传算法叠前反演构建虚拟井曲线（Mallick等，2000），反演波阻抗与井中波阻抗吻合很好

地震反演研究进展

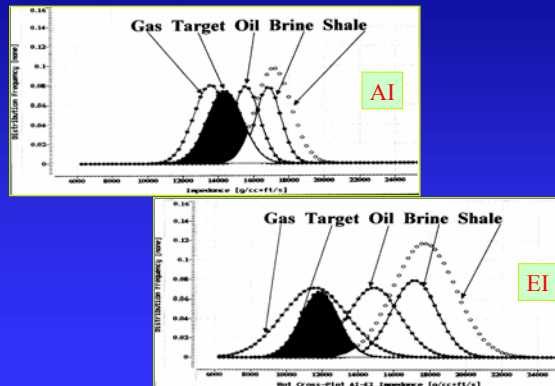
--叠前和叠后混合反演方法



在1、2、3箭头所标注的位置进行叠前反演，利用在离散点处叠前反演获得的P波和S波阻抗作为虚拟井控制，构筑虚拟井控制的高精度初始波阻抗模型，进行叠后反演P波阻抗和S波阻抗（Subhashis Mallick等，2000）。

地震反演研究进展

--弹性波阻抗反演方法



地震反演研究进展

--弹性波阻抗反演方法基本原理

$$E_1 = \alpha_1^{1+\tan^2 \theta} \beta_1^{-8K \sin^2 \theta} \rho_1^{(1-4K \sin^2 \theta)},$$

$$E_2 = \alpha_2^{1+\tan^2 \theta} \beta_2^{-8K \sin^2 \theta} \rho_2^{(1-4K \sin^2 \theta)},$$

$$K = \frac{\left[\left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2}{\alpha_2} \right)^2 \right]}{2}.$$

$$R(\theta) \approx \frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1}.$$

地震反演研究进展

-- 弹性波阻抗反演方法基本原理

$$\cos^2 \theta \ln(E) = \ln(\rho\alpha) - [4K\{\ln(\rho) + 2\ln(\beta)\} + \ln(\rho)] \sin^2 \theta + 4K[\ln(\rho) + 2\ln(\beta)] \sin^4 \theta.$$

$$\ln(E) \approx \ln(\rho\alpha) + [\ln(\alpha) - 4K\{\ln(\rho) + 2\ln(\beta)\}] \sin^2 \theta.$$

$$\ln(E) \approx \ln(\rho\alpha) + [\ln(\rho\alpha) - 2\ln(\rho\beta)] \sin^2 \theta.$$

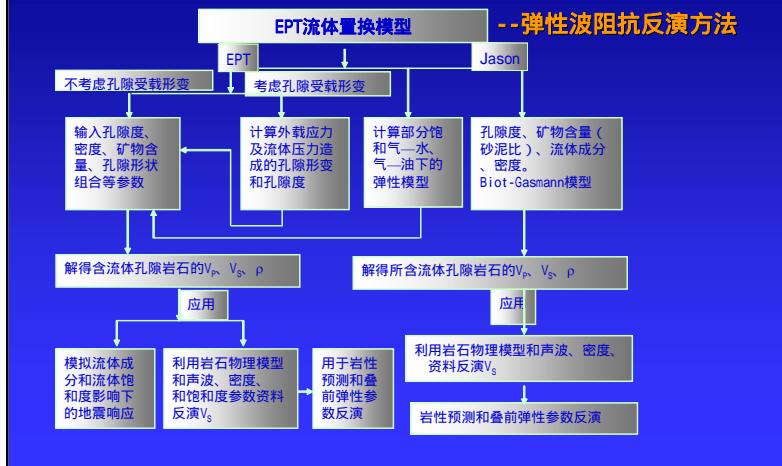
地震反演研究进展

-- 弹性波阻抗反演方法



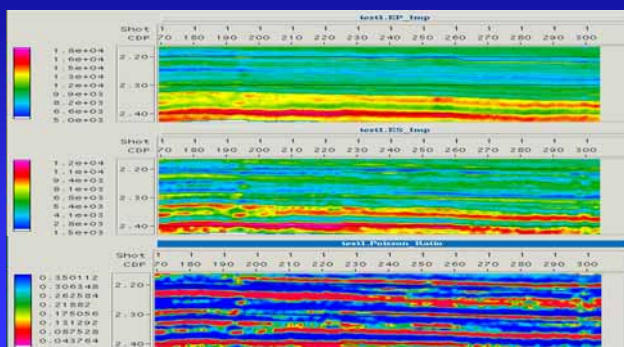
地震反演研究进展

-- 弹性波阻抗反演方法



地震反演研究进展

-- 弹性波阻抗反演方法



纵波阻抗、横波阻抗和泊松比剖面(EPT, 2001)