



地震勘探的高分辨率技术

石油工业部石油科学技术情报研究所



26349

地震勘探的高分辨率技术

任 俞

11/10

52/71/13



200398756



石油工业部科学技术情报研究所

一九八六年十月

目 录

第一部分 模式分析	(1)
一、影响分辨率关键性因素的分析	(1)
1. 频带宽度与上限频率	(2)
2. 噪声因素	(3)
3. 波谱形状因素	(3)
4. 横向分辨率探讨	(4)
二、薄层	(7)
1. 薄层定义	(8)
2. 薄层类别及其特征	(8)
三、提高分辨率的几种新途径	(10)
1. 从时域进入频域—频谱与积分能谱分析法	(10)
2. 应用最大熵原理提高地震分辨率	(13)
3. 波速分析对于薄层分辨的效益	(15)
第二部分 实用手段	(20)
一、野外采集	(20)
1. 高频震源	(20)
2. 检测系统与排列设计	(24)
二、高分辨率分析处理方法	(26)
1. 常规地震处理流程中的几点特殊要求	(26)
2. 苏联地震“高分辨分析处理方法”的一些特点	(27)
3. 几种有效反褶积处理方法	(29)
4. 偏移技术简评	(39)
三、新方法的应用	(42)
1. VSP法在提高分辨率中的作用	(42)
2. 横波勘探法的分辨能力	(50)
3. 有关“三维地震法”分辨实效的评价	(55)
第三部分 勘探实例	(59)
一、在苏联推行的一种“高分辨率地震勘探法”实例	(59)
二、高分辨率数据采集的实例	(62)
三、利用真幅值地震波形特征分辨薄层数例	(65)
四、应用 VSP 资料探出小断距新层 二 例	(67)
结语	(72)
主要参考文献	(73)

地震勘探的高分辨率技术

编者按 本文是石油科技情报研究所为石油部大庆科委提供的专题咨询调研项目之一。主要是针对松辽盆地油气勘探中存在的实际问题，搜集了一些国外有关的技术资料编写而成，对于我国其它探区也具有一定参考价值。

在我国各大探区，譬如说，松辽盆地的油气勘探中，不论是浅层薄泥砂互层、“三小”（小青斜、小断块、小砂体）构造还是深层古潜山构造、基岩断裂带、大三角洲砂体等隐蔽油气藏的勘探皆迫切需要提高地震法纵（垂）、横向的分辨能力。近十多年来有关的文献虽不少，但因其论述观点、出发角度与目的对象皆各有不同，只有根据我国探区的实际需要，将有关成果归纳一下，分为以下三个方面作一介绍。在调研过程中曾获得大庆物探公司技术领导的帮助，在此表示感谢。

第一部分 模式分析

模式分析主要依靠数学运算与简化物理模型以合成记录与试验分析作为手段，针对在各种波阻抗结构下，薄层（包括互层）、楔形体、透镜体断块及其各类组合体的地质模式进行实验室的分析研究，从理论上为提高地震分辨率的有利因素、有效途径及可能性提供了依据。

为使模试结果具有指导意义，模式分析中要作出若干基本符合实际的简化假设（如假设薄层所在上、下介质的密度不变、泊松比值为常数、震源子波恒定等），忽略某些非关键性参数的影响（如吸收和扩散引起的衰减、多次反射等），围绕几个主要参数（如界面上、下的波速比值、目的层厚与深度等），模拟几种具有代表性的单元地质结构（如尖灭、透镜体、薄层、小断块等）进行大量实验与分析，现已取得不少成果。

一、影响分辨率关键性因素的分析^[55]

纵向分辨率是区分薄层的能力，而横向分辨率是区分横向波阻抗细节变化的能力，如分出断层、河道、岩性异体和断裂带等。

纵向分辨率主要取决于信-噪比值、子波频谱宽度与上限频率、相位谱和波谱形状等，笼统地说，也就是优势信-噪比信息的频带宽度；而横向分辨率除受上述因素的影响之外，检波点距与偏移速度的准确度也很重要。

下面首先着重分析一下影响纵向分辨率的几个关键性因素：信-噪比值、地震子波频谱宽度、上限频率、相位谱、波谱形状以及相互之间存在的相互影响。

Widess 为纵向分辨率 Pa (Resolving Power) 作出的定义*，在不计噪声的情况下是：信号波峰幅值平方 a_m^2 与子波总能量 E 的相对比值。

$$Pa = a_m^2/E$$

按此定义, 尖峰信息 (频谱无限宽) 具有无限大的分辨率, 而一无限延长的信息 (频谱为单一频率), 其分辨能力为零。借此可以评价不同子波波形的分辨能力。

Widess 曾对分辨力 Tr (Resolution) 给出定义, 作为: 分辨率的倒数, 可以导出:

$$Tr = 1/(2 \times \text{频带宽度})$$

而 Kallweit 给出的分辨力定义则取决于频谱的上限频率 f_u :

$$Tr = 1/1.5 f_u$$

当子波频宽接近二个倍频程时, 按此二定义算得的结果十分相近。实用中: 在子波频宽偏低时 (低于二倍频程) 常以 Widess 上述定义为主; 而在子波频宽偏高时 (高于二倍频程), 则以 Kallweit 定义为主。

1. 频带宽度与上限频率

在信号频带宽度不超过二倍频程时, 利用 Widess 对分辨力的定义可以看出, 它主要取决于信号频带的宽度。图 1 表明, 具有 5—35 赫频带宽度的子波与 120—150 赫子波的分辨力相同。由于子波的持续时间是带宽的函数。中心频率升高时, 单个周期虽小, 持续时间却与低频的相同, 因而分辨率不能借此提高。高频可使主峰周期缩短, 低频成分可以减小子波的旁瓣幅值。实际上因为地震波在运行中高频成分衰减较快, 观测与分析中提高高频成分就成为一项重要任务。

在子波频谱较宽 ($>$ 二倍频程) 时, 由于这时子波的旁瓣已很微弱, 不再成为影响分辨率提高的关键因素, 就宜根据 Kallweit 对分辨力所下定义, 依靠进一步提高频谱的上限频率 f_u ($=f_2$) 来缩短其子波主峰的宽度, 才能进一步提高地震记录的分辨率。

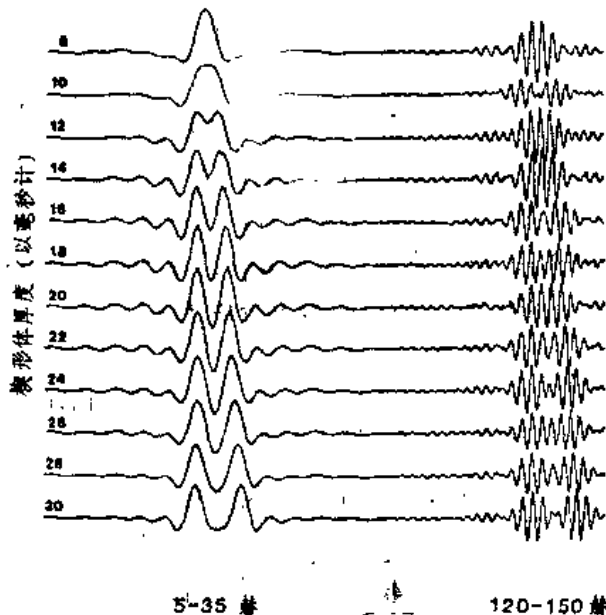


图 1 在信号频带不宽时, 中心频率不同而频宽相同时, 分辨率相近示意图

注* 衡量纵向分辨率的尺度还有多种: Rayleigh 用的是峰-谷距; Ricker 用的是主瓣宽度; Berkhout 用的是元阶信号长度 (first-order signal length)

2. 噪声因素

上面的分辨力定义是在假设噪声为零时作出的, 实际上, 野外信息是脱离不了噪声的。在噪声甚强 ($S/N \ll 1$) 反射信号根本无法识别时, 所谓“高分辨”的宽频信息也就失去了实际意义, 因此实际分辨力必须将信-噪比值 (r) 这一重要因素也考虑在内。又因噪声频谱成分中超出有效信息之外的部分可以滤除, 可以认为信、噪二者的频带宽度是相同的。这里, Widess与Kallweit对分辨力的定义分别变为:

$$Tr = (1 + 1/r^2) / (2 \times \text{频带宽度});$$

$$Tr = (1 + 1/r^2) / 1.5fu$$

在信-噪比值低于1时, 提高记录的信-噪比值成为改善分辨力的关键因素 (当 r 从0.5升为1时, 分辨力可以改善2.5倍!), 但是在 $S/N > 2$ 以后, 进一步提高 S/N 值, 对于分辨力的改善来说就意义不大了 (当 r 从2升为4时, 分辨力仅改善了18%)。

下面给出一张楔形体模型试验对比图 (图2), 人为控制噪声, 使得信-噪比值分别为0.5与1。从图上可以明显看出二者直观分辨力的明显差别。

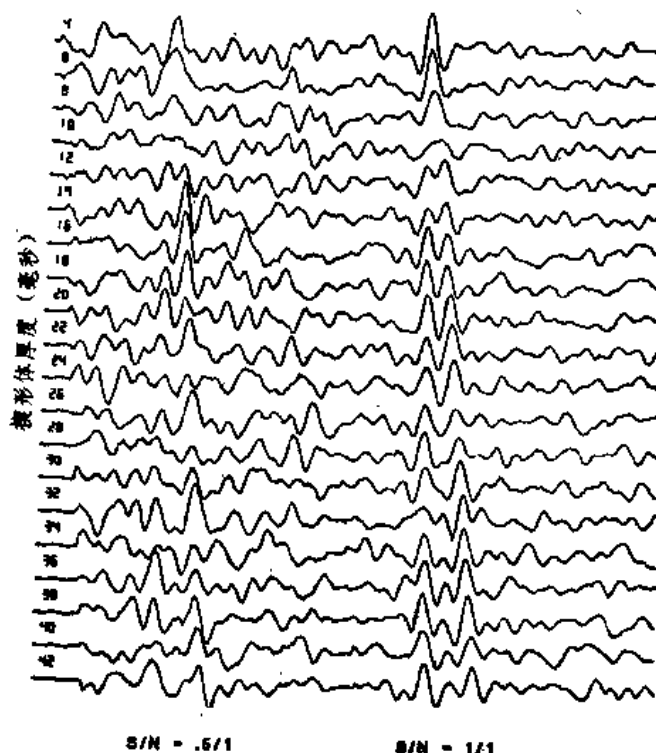


图2 噪声对于楔形体分辨率的影响。

3. 波谱形状因素

模式分析表明, 在相同的频带宽度之下, 只要波谱形状不同, 实际分辨率也会有所差别的。分辨率最佳的是盒形 (Box-Shaped) 波谱, 其次是正弦倾斜 (sin ramp) 谱、更差一些的是直线倾斜 (Line ramp) 谱。直线倾斜谱只有在频带宽一些 (约22%) 的情况下, 才能取得与盒形谱相同的分辨能力 (见图3示意)。

因此, 要想提高分辨率, 使用可控震源时, 应当尽可能地锐启锐止, 不宜拖头带尾。

地震信号的相位谱对波形的影响也很大, 信号频率成分的相位愈接近零值, 波峰就愈加

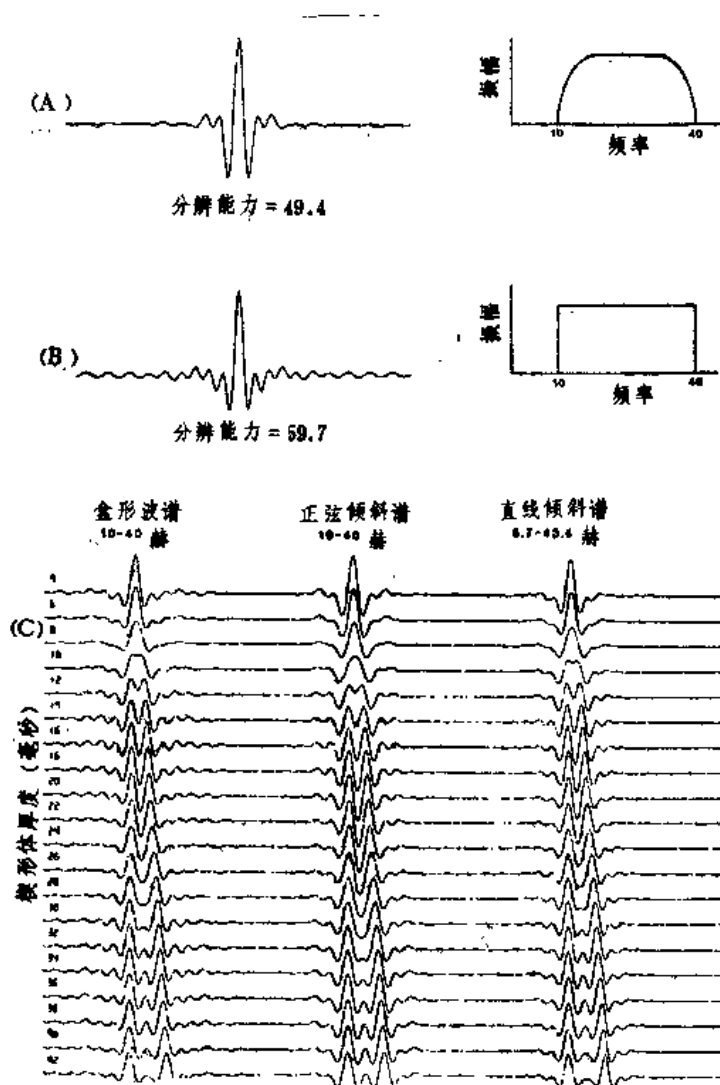


图 3 波谱形状对于楔形体分辨率（分辨率）的影响（实验结果对比）

(A) 盒形频谱；(B) 正弦倾斜谱；(C) 对楔形体的分辨率示意。

突出，这样记录上的直观分辨率也就愈高。因此，在选择震源和记录系统时要尽可能选择相位谱近零的震源（如炸药、气枪等）与相移小的仪器设备。但是，由于在分析处理过程中，还有可能运用一些先进的反褶积手段（如维纳滤波等）人为地将所录信号的相位谱朝最小相位方向调整，以补偿已有的相移。这些方法现已取得较好结果。所以在评价记录系统的分辨率时，现在一般并不将相位谱作为主要因素予以考虑。

此外，一薄层顶、底反射波的极性是否一致还会影响到复合反射波幅的大小，如果极性已知，就可根据复合波波幅来估测薄层的厚度。为了估计正确，这时要求记录的信-噪比值最好能大于或等于 4。

上述分析为人们提高分辨率指明了一条十分明确的途径：

在 $S/N < 1$ 的地区，要以提高 S/N 作为主攻方向；

在 $S/N > 2$ 的地区，则应以提高原始地震信息的频带宽度与上限频率作为主攻方向；

在 S/N 比值甚高的地区，必要时甚至可以不惜以稍稍牺牲一些 S/N 值作为代价，千方百计提高最终记录的频带宽度与上限频率。

4. 横向分辨率探讨^[59]

研究横向分辨率对于勘探非背斜构造及地层学油气藏十分重要,但有关的论著不多。过去多以菲涅尔(Fresnel)带的理论为基础,将 $1/2$ 菲涅尔带深视作横向分辨的最小距离。自从引入“空间子波”的概念以后,才开始细致、定量地研究横向分辨力。

横向分辨力的定义是:二个绕射点得以分辨的最小水平向距离(ΔX)。从理论计算所得的检波排列响应 $A(\phi)$ 曲线图中(图4)可以看出:当二绕射点所产生的排列响应曲线相离一定距离,使二曲线在相交点处的幅值低于总幅值的35%时,就可以从合成的总曲线上清晰地分辨出此二反射点来。依此可以推得横向分辨力 Δx 的计算公式为:

$\Delta x \geq 0.7\lambda Z_0 / (2N\Delta X_s)$; 式中: $2N$ ——排列内的检波点数; ΔX_s ——排列内的检波点距; Z_0 ——反射点深度; λ ——信号波长($=v/f$)。

从公式可见,要想提高横向分辨率(减小 ΔX),必须提高信号频率和排列长度,而且波速误差和检波点距过大也会降低其分辨力。下面将有关的一些实验分析结果引述一下。

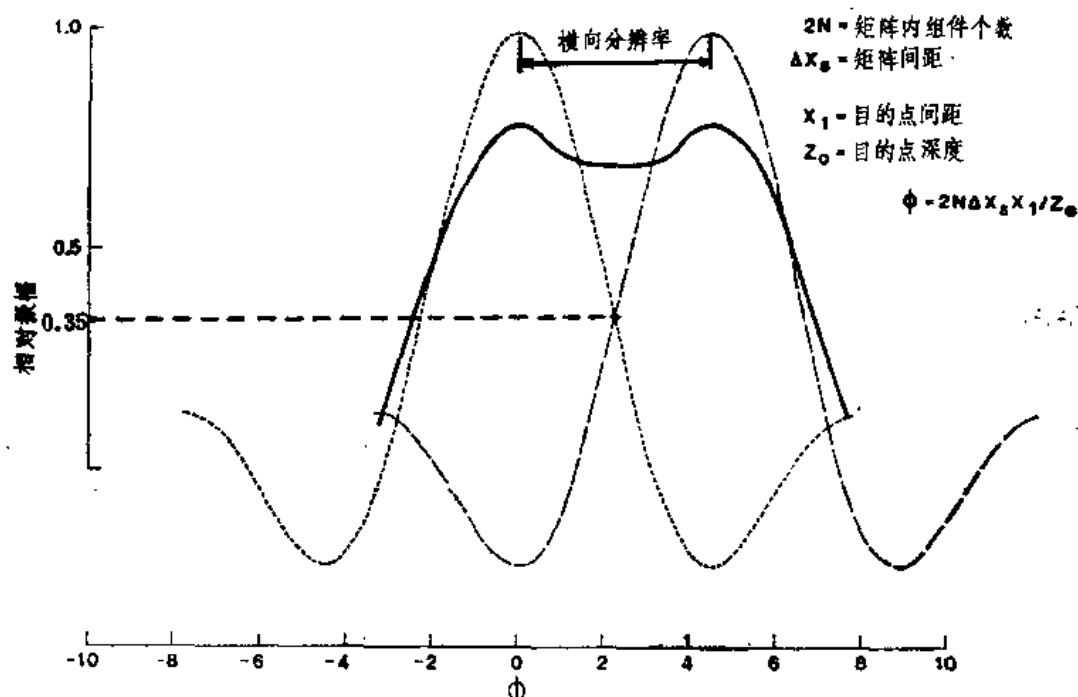


图4 在检测反射点时所取得的合成源-检排列响应曲线图,虚线表示单个反射点的响应,实线表示二反射点的总合响应。

$$A = \sin\phi / \sin(\phi/2N); \quad \phi = 2N\Delta X_s K X_1 / Z_0$$

参量说明如前文; K 表示波数; x_1 表示反射点间距。

(1) 从图5可见,在 $\Delta X_s = 25$ 米、 $V = 2500$ 米/秒、 $Z_0 = 2000$ 米、信号频率为8—40赫($f_{\pm} = 26$ 赫)、二反射点横向相距100米时,随着排列内检波点数量 $2N$ 的增加: $41 \rightarrow 61 \rightarrow 81 \rightarrow 101$ (与此相应,排列长度分别为1000、1500、2000、2500米),分辨能力在逐步上升。当 $2N = 61$ 时,图上已可分辨,这与按照上式推算所得的结果($2N = 54$)相符甚佳。

(2) 图6表明,在信号频带逐步提高的情况下,横向分辨率的改善十分明显。

(3) 文献[59]还表明,如果偏移处理时所取波速有误差的话,它不仅会引起反射点的深度误差,也会使横向分辨率有所下降,而且信号频带愈窄,分辨率下降就愈加明显:在信号频带较宽时(8—80赫),反射点深度误差即使达8%($\Delta Z/Z_0 = 160/2000$),相距100米的

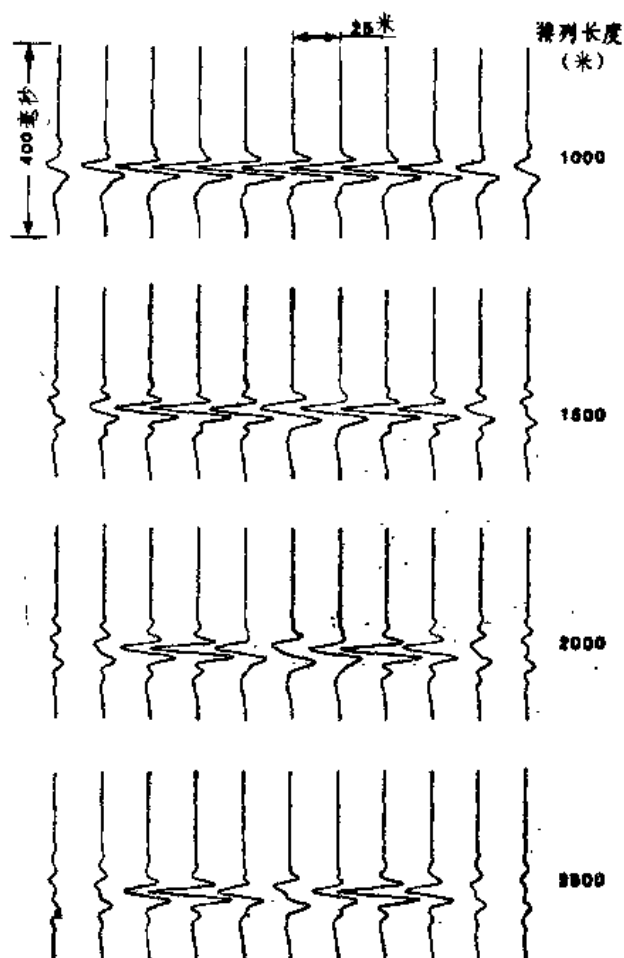


图 5 在 $\Delta x_s = 25\text{m}$ 、 $V = 2500\text{m/s}$ 、 $Z_0 = 2000\text{m}$ 、 $ff = 8 \sim 40\text{Hz}$ 、反射点相距100米时， $2N$ 分别为41、61、81、101时所获地震记录的横向分辨图

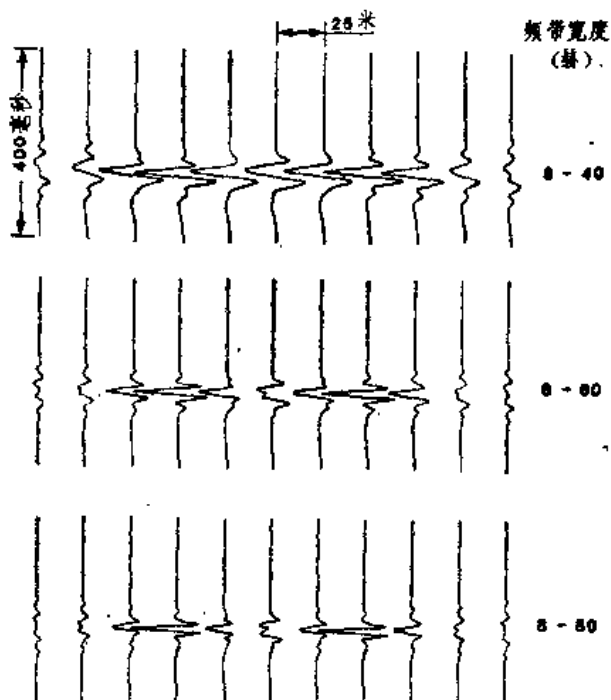


图 6 在信号频率逐步提高时(其它参数同图 5)，所获地震道记录的横向分辨图改善的情况

二反射点仍能清晰分辨；而当频带变窄时（8—40赫），只有在深度误差 $\leq 2\%$ ，才得以分辨（见图7）。

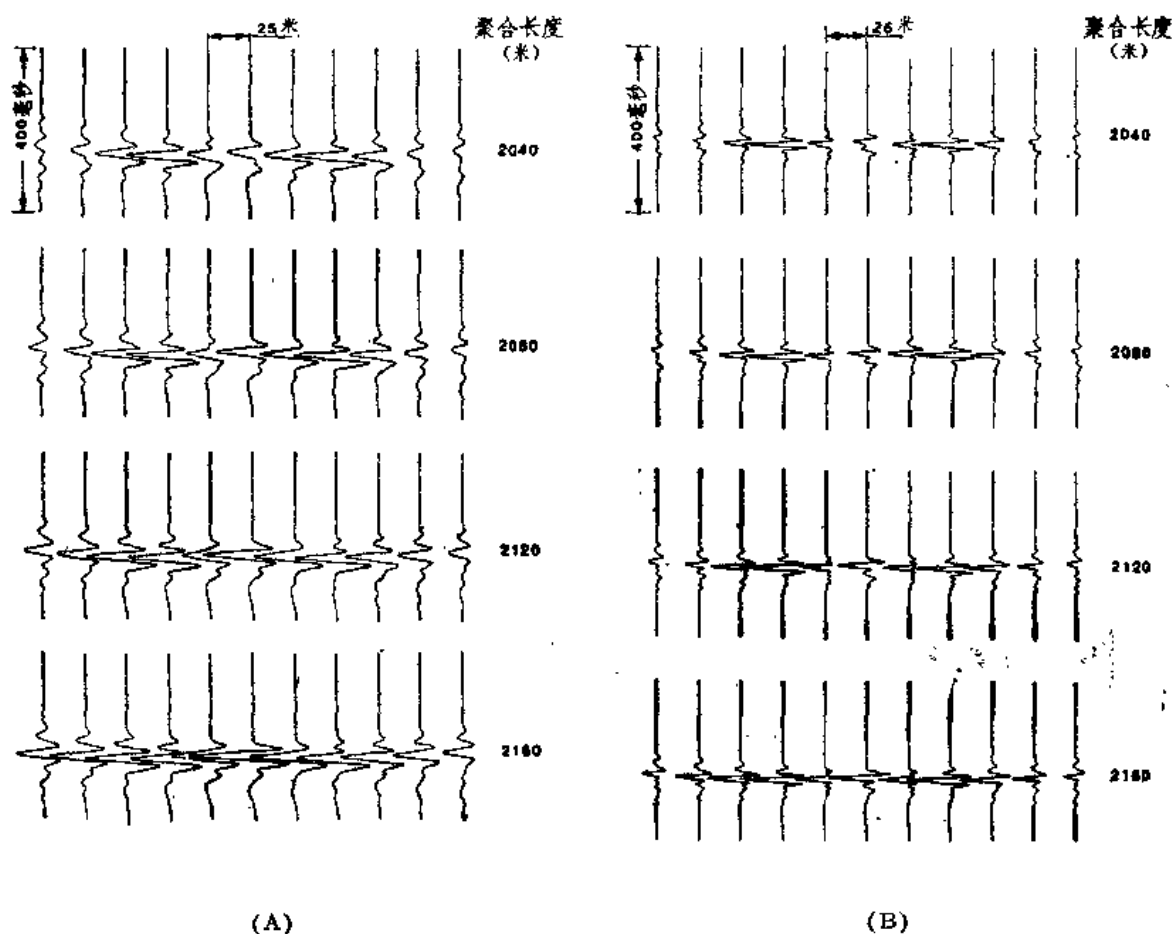


图7 在信号频带分别为8—40赫(A)与8—80赫(B)的不同情况下，由于所取介质波速误差所引起的横向分辨率恶化记录图(其它参量相同：排列长度为2500米，反射点横向间距100米，实际深度2000米，正确的介质波速应为2500米/秒)

4. 检波点距 ΔX_s 值不能过大，因为空间采样间隔过大会引起伪噪声（见图8），一般不得超过信号的半波长。

总之，提高信号频带宽度与上限频率、适当提高排列长度、检波点距不得过大是野外采集时必须十分注意的事。处理时，选取合适的反褶积和偏移技术，以较高精度求取介质的平均波速是提高横向分辨率的要害所在。反褶积处理有助于进一步提高信号的有效频带宽度，偏移技术则可看成是缩短空间子波的一种横向反褶积过程。选取偏移方法时应尽可能不要过早、过小地限制偏移处理中的倾角范围，才能有助于横向分辨率的提高，如克希荷夫波动方程偏移法就是相当得用的一种。

二、薄 层

所谓“薄层”从概念上讲，指的是厚度较小的地层，当其厚度低得使人们无法从地震图上将顶、底信息直观地区别开来时，就可列入“薄层”范畴。实际上，薄层的厚度信息仍是包涵在信号的振幅函数、波形、频谱等动力学特性之中的。依靠一番分析处理之后，往往还

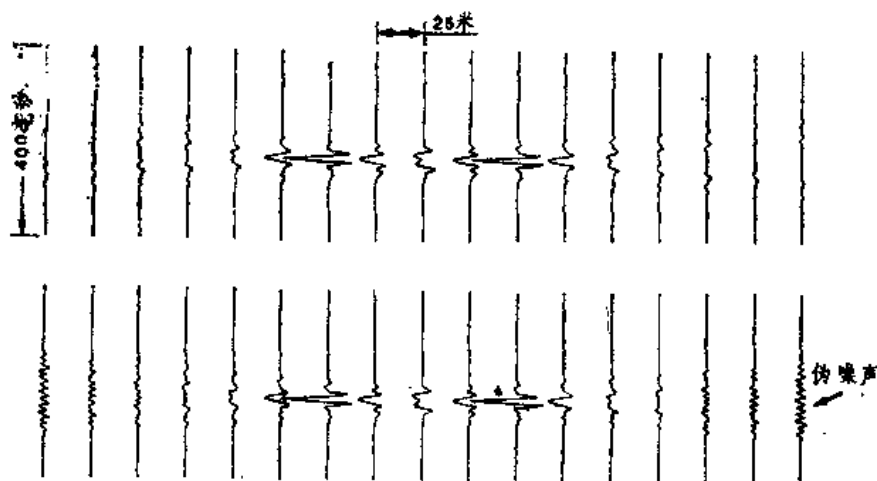


图 8 当空间采样间隔过大, 分别为75米(上)与150米(下)时,
记录上出现的伪噪声合成图
(信号频带: 8—80赫, 排列长度: 1500米)

是能够加以分辨的。由此可见;所谓“薄层的勘探问题”实际上属于对纵向分辨率更进一步的要求。

1. 薄层定义

早在1956年苏联顾尔维奇, 1961年 Sengbush 就分别发现当地层厚度等于 $1/4$ 子波波长 (λ) 时, 反射波幅会出现异常, 因此将 $\lambda/4$ 称为地层的调谐厚度。1973年, Widess用零相移子波作实验时, 发现当层厚为 $\lambda/8$ 时, 反射波形正好是入射波形的导数, 并可直观鉴别其顶、底反射, 从而将厚度低于 $\lambda/8$ 者定义为薄层。但此结论只限于单频零相的理想情况。1982年 Kallweit 利用可控震源研究了薄层响应的频谱后, 提出分辨地震波的实际极限, 以双程旅行时表示等于 $1/1.4f_u$ (f_u 为子波上限频率), 经主频换算后此值近似等于 $\lambda/4$ 。因此, 实用中薄层被定义为: 厚度低于入射子波调谐厚度 ($\lambda/4$) 的地层。

2. 薄层的类别与特征

大量数学模拟运算结果^[5]表明, 只要抓住了影响薄层分辨率的关键性参数——顶、底层反射系数相互关系——的特征所在, 就可以将复杂多样的地下薄层结构合理地归纳成为两种基本类型的组合, 这两类薄层产生的反射波各具明显不同的动力学特点。研究清楚这些特征将十分有助于根据地质条件不同, 选择不同的措施来提高其分辨能力, 也可以避免一些错误的地质解释, 如实用中就曾多次发生过将薄层当作岩性相变, 超复而作出错误解释的教训。

(1) 第一类是韵律性薄层(即异速性)(即 $m < 0$; $m = k_2/k_1$; k_1 与 k_2 分别为薄层顶、底的反射系数), 当薄层波阻抗高于或低于上、下介质时, 皆属此类, 通过波动方程演算可以证明:

①在厚度 $= \lambda/4$ 时, 出现调谐性波幅增大 (Q值出现极大), 相位为零, 反射波 t_0 值不偏移。

②反射波强度随着厚度减小甚缓, 当厚度 $= \lambda/40$ 时, 反射波强度仍为单层界面反射波幅的30%而不消失, 唯其相位明显超前, t_0 时间偏小。

③ 它对反射波所起作用与一带通滤波器相似。此“滤波器”主频随厚度而变，厚度 τ （以时差表示）愈小，反射波主频愈高，相互关系见表1（在 $V=2000$ 米/秒时）。

表 1

层厚时差 τ (毫秒)	主 频 f_0 (赫)	对应的层厚(米)
2	250	2—3
4	125	4—6
10	50	10—15
20	25	20—30

④ 此类薄层的滤波特性曲线具周期性，以 $f\tau=1$ 为周期，当 $f\tau=N$ （ N 为整数）时，输出极小，而 $f\tau=N+1/2$ 时输出极大。

（2）第二类是渐变型薄层（ $m>0$ ），薄层的波阻抗界于上、下介质之间（海进或海退时的沉积或页岩覆盖含油砂层时皆属此类）。其特点与第一类大不相同：

① 当层厚 $=\lambda/4$ 时，反射波幅极小（ Q 值极小，当 $m=1$ 时， Q 值为零），相位特性有突变，反射波极性转换。

② 当层厚 $<\lambda/4$ 时， Q 值增大，并逐步过渡到上、下界面合并的单界面状态，相位特性由滞后恢复到零。

③ 其作用相当于一低通滤波器，随着厚度增加，反射波主频朝低频方向移动。

④ 其滤波特性曲线也以 $f\tau=1$ 为周期，但是当 $f\tau=N$ 时出现极大，而 $f\tau=N+1/2$ 时出现极小。

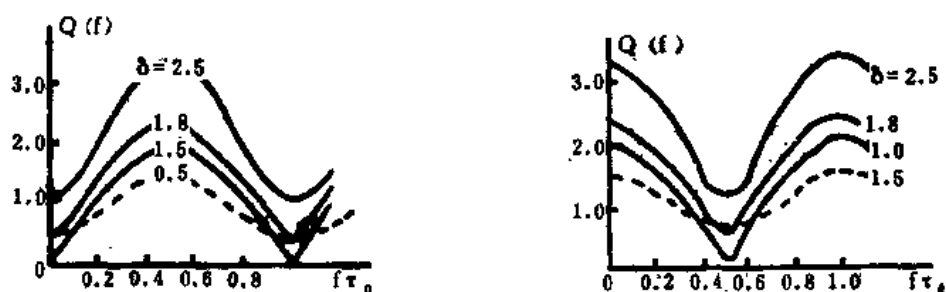


图 9 两类薄层频率特性对比

(A) 韵律型 ($m<0$)；(B) 渐变型 ($m<0$)； δ 是薄层底、顶纵波反射波幅的比值。

（3）与泥沙互层极其相似的是由多个韵律薄层构组的合层，通过运算、分析，表明其特点是：

① 单层厚度达1米以上的多互层也可以形成相当强的反射波。

② 当反射系数不很高时（设 $K \leq 0.1$ ）反射波振幅谱具有极大和极小点——多峰谱，可以借此鉴别与分辨薄互层。

③ 当反射系数 K 值增大或层数无限增加时，峰点会减少。

④ 薄层间距 τ' 与薄层厚度 τ 之比值 $L(=\tau'/\tau)$ 对峰值点的数量与频谱周期皆有显著影响，只有当 L 为整数时，频谱曲线的周期才为 $f\tau=1$ 。

这些数学运算结果基本上与物理模型实验结果相符。由于在勘探区内,反射系数(K值)甚低的情况还是相当常见的。因此,利用反射波作频谱分析来分辨薄互层的前途是鼓舞人心的。

三、提高分辨率的几种新途径

1. 从时域进入频域——频谱与积分能谱分析法^[25]

通过对单层韵律型薄层(“偶极”式)模型所得反射函数的频谱分析表明:在入射子波已知的情况下,影响薄层反射子波频谱幅值的主要参数是岩床的厚度 d 。单偶极产生的频谱曲线具有 $1/\tau$ 的周期性。当偶极厚度 d 等于入射波调谐厚度 $\lambda/4$ 时,其反射函数频谱曲线第一周期内的主频值将与入射子波主频相同。当 $d < \lambda/4$ 时,反射主频偏低,反之偏高。尽管当 $d < \lambda/4$ 时,在时域地震图上难以直观识别薄层的存在,但是通过反射信息的频谱分析,就有可能借助其反射波主频与入射子波主频间的差别来发现薄层并估算出其厚度来。因而反射信号的频谱分析法可以作为提高地震法分辨率的一种有效手段。

但是在地下存在互薄层或更为复杂的情况下,利用一般振幅频谱分析法也难以分辨时,还可采用分辨能力更高的积分能谱[INTENS]分析法。这是1983年Marangakis通过数学分析与模型实验双重论证取得的成果。积分能谱 $E(f)$ 是按照子波波谱频带宽度为10—60赫时作出定义,以百分率值来计算的:

$$E(f) = 100 \int_{10}^f A(f) A^*(f) df / \int_{10}^{60} A(f) A^*(f) df$$

式中: $f \leq 60$, $A(f)$ 是频谱成分的振幅, A^* 是其共轭复数。

尽管推论是以辛克(sinc)子波作为基础的($\text{sinc} \omega t = \frac{\sin \omega t}{\omega t}$),但是对于其它地震子波来说,结论仍然适用:与一般振幅频谱相比,积分能谱曲线宽度更窄,相对于层厚度的变化更为灵敏,振幅频谱中的峰值部分转换成INTENS中的高陡度线段,而谷值部分则转换为低陡度线段。积分能谱不仅受新频谱幅值的影响,也受新频谱形状(动力学特征)的影响。

为证实推论,Marangakis针对几种常见的地质薄层模式单元进行了实例分析:

(1) 双偶极模式——即当偶极间距等于偶极厚度时的情况。这时振幅频谱曲线的形状与单偶极所得结果相同;峰值皆出现在调谐频点上不变,因此难以鉴别二者差别。然而能谱图上却出现了具有更窄的旁瓣曲线图形来。旁瓣的数量与幅度取决于偶极的厚度与偶极间距。偶极(互薄层)数量的进一步增加将产生更多的旁瓣。而且这些曲线图可以与厚岩床频谱中出现的周期性区别开来。

(2) 两种楔形模式

一种是高速楔形体,另一种是变速层楔形体(模式参数与结果见图10、11)。

从图10上积分能谱恒值线的统一拐点所在,可以明确指出楔形体的终端所在。减薄方向可由等值线的倾斜方向看出。而这些参量从多道地震反射波形图与振幅频谱分析上都是难以确定的。

变速楔形体内的波速随深度作线性变化: ($V = V_0 + aZ$)。用它可以模拟地质上颗粒逐渐变粗的碎屑岩楔形构造,从图11可以看出,随着变速区厚度的增加,变速楔形体的积分能谱在低频部分加强了,也就是等值线具有朝变速层加厚方向倾斜的特点。楔形体终端位置

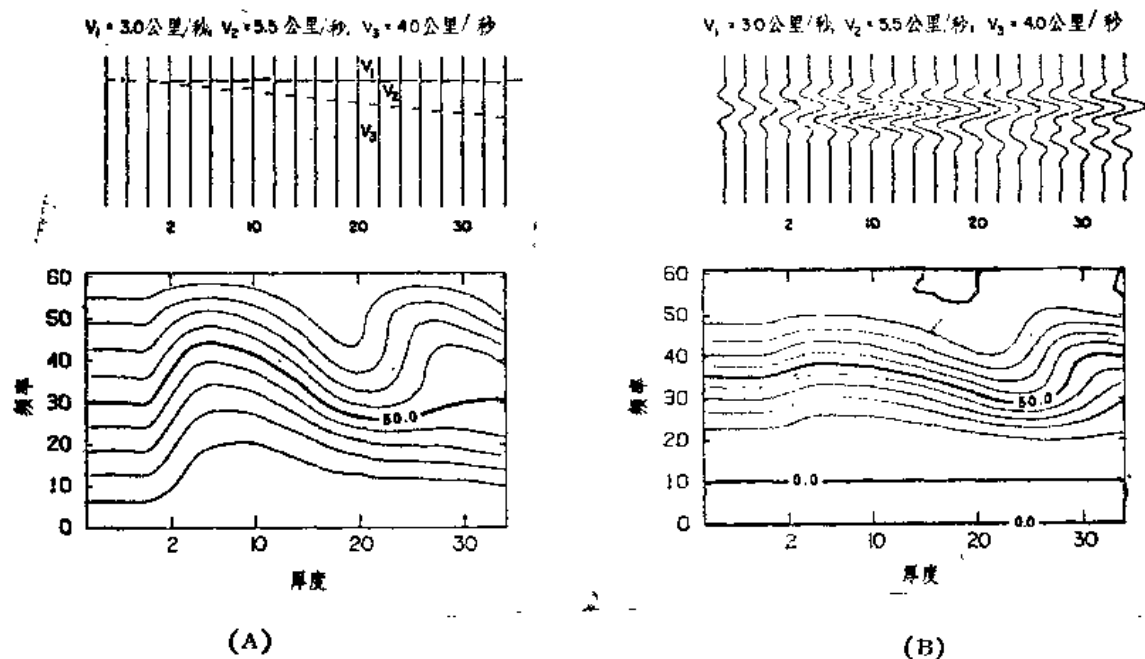


图 10 高速楔形体多道反射波形图与其积分能谱等值线图。楔形体厚度自第三道后开始朝右线性增加，每道增加 2 毫秒，最高达 34 毫秒
(A) 根据反射率函数直接运算的结果；
(B) 入射子波经过褶积处理后的反射率函数运算结果。

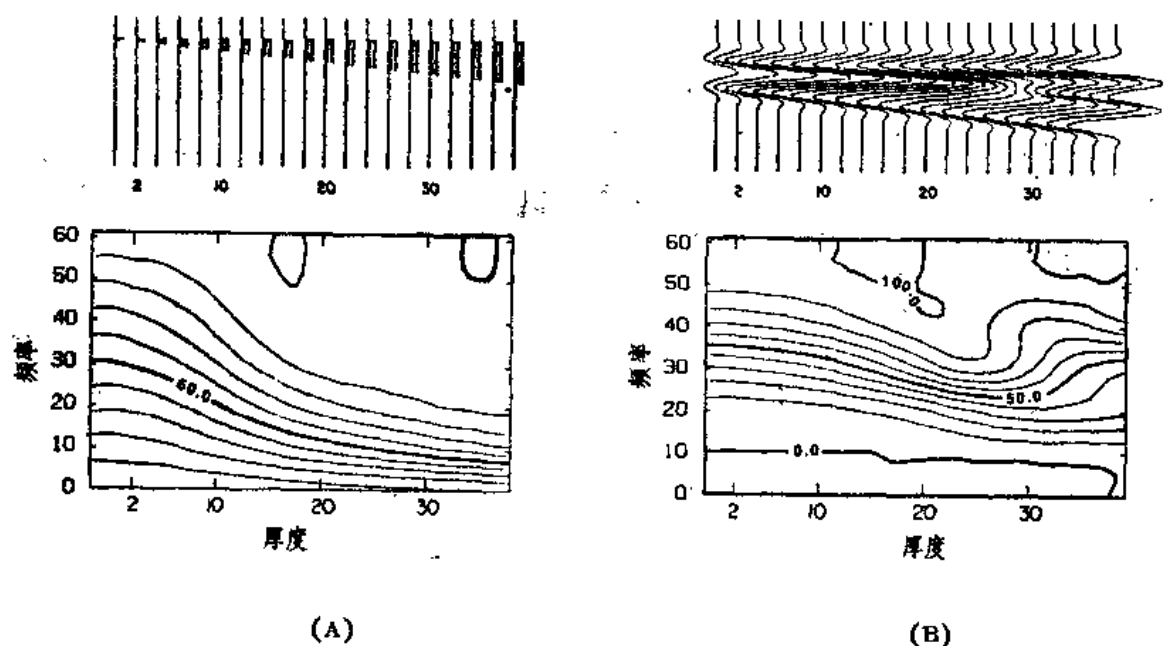


图 11 变速楔形体多道反射波形图与其积分能谱等值线图 (A、B 注释同图 10)

同样可以从等值线倾角稳定为零之处确定，而这些参量依靠地震图与振幅频谱分析是更加难以识别的。

比较图 10 与 11 可以看出：尽管两种楔形体外形相同，但是高速（或低速亦然）楔形体具有与变速楔形体不同的积分能谱等值曲线图。

通过图中 (A) 与 (B) 的相互对照也可看出，尽管在 (B) 图中由于子波受到褶积的滤波作用使曲线变得较为平滑，但总的趋向与特点仍是改变不了的。

(3) 两种薄透镜体模式：一种是递变型（或称阶梯式）薄透镜（ $m < 0$ ），另一种是高速薄透镜体（说明见图 12、13）。

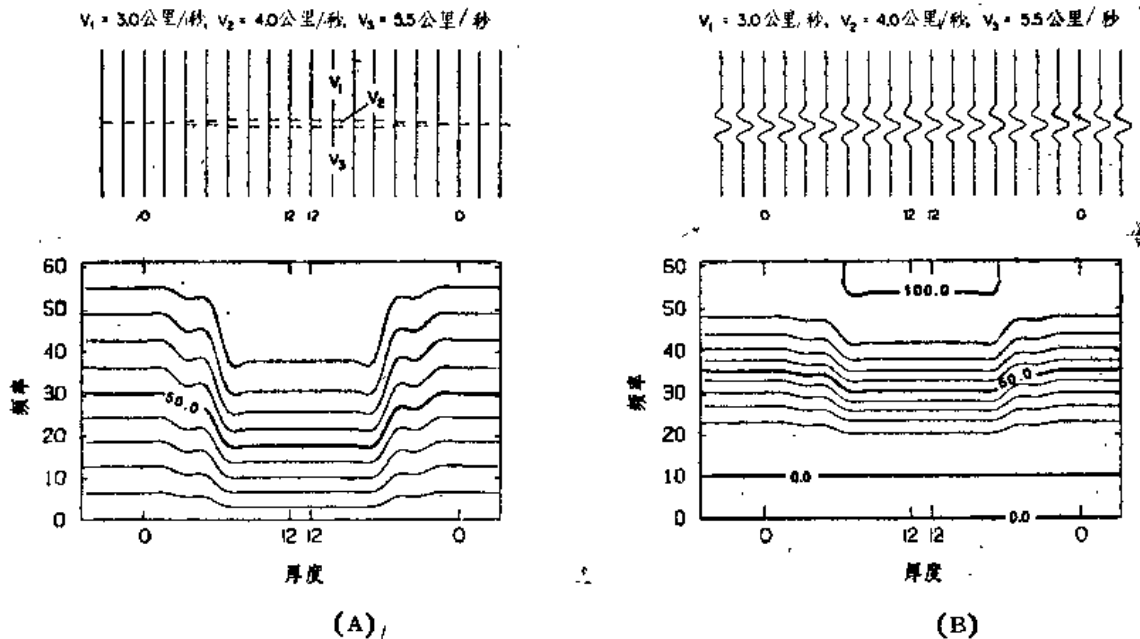


图 12 一种递变型薄透镜体多道反射波形图与其积分能谱等值线图，透镜体最大厚度 12 毫秒（A、B 注释同图 10）

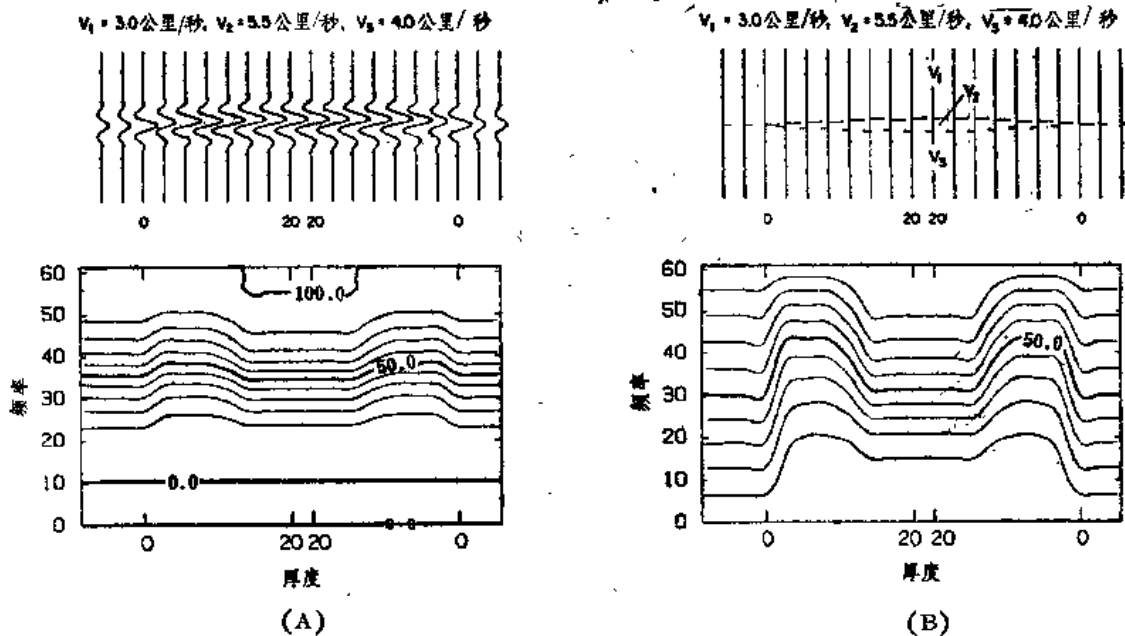


图 13 一种的律型高速薄透镜体的多道反射波形图与其积分能谱等值线图。透镜体最大厚度 20 毫秒（A、B 注释同图 10）

由图 12 可见，由于波速阶梯式上升，从反射波形图上看不到明显的调谐效应，因此直观上几乎无法觉察该透镜体的存在。但是从积分能谱等值线图上，尽管由于透镜体的曲率半径很大，使得曲线的偏移起伏不大，但也可以检测出透镜体的边缘所在和减薄方向来。

同样，在图 13 中，高速薄透镜体的尖端位置以及透镜体变薄的方向也可由积分能谱等值线的拐点（陡度骤增处）所在和曲线的倾斜方向明显看出。上述两种薄透镜体形状尽管相同，但由于上、下介质的波速关系不同（即薄层类型不同）它们产生的积分能谱等值线图

象也就大不相同。由此可得结论：

① 只要将厚层与上述几类薄层单元体合理地加以组合,就可以模拟任意垂向与水平向的波速分布状态,并可绘制出合成数据的二维积分能谱恒值曲线图来,将其与实际地震数据的积分能谱进行比较,有助于复杂地区地震资料的正确解释。

② 通过实验还表明:积分能谱的等值曲线图形与相邻道间的相对幅值无关,而且根据时移论,也不会受道间静态时差的影响。尽管此法对于空间采样率较为敏感,然而,即使在共深度点相距较远的情况下,积分能谱等值曲线的图形特征也能保持不变。

③ 尽管两种楔形体与两种薄透镜体的外形相似,但是只要其波速特征不同,从它们的积分能谱等值线图,也可以看出差别来。

目前能谱分析法在薄层勘测中的应用尚处于初始阶段,但是已有依据可以相信,它不仅在薄层构造的勘查中,而且在岩性圈闭的勘探中也是大有发展前途的。

2. 应用最大熵原理提高地震分辨率

熵(Entropy)是信息论中一概念,用它可以量度信息的不确定性。最大熵原理要求一个时间序列在时窗内符合已知数据条件,在分析对象时窗以外的未知部分则保持最大不确定性(即最大熵)。这一假设比通常地震资料处理中对时窗以外全部充零的做法(如付氏变换)要更加符合实际,因此在频谱分析中能够较好地保持地震记录原有的频谱成分,具有较高分辨能力。尤其是在薄层分析中,时窗往往不能取得过长,当计算时窗小于信号延续时间时,用付氏变换求频谱就会产生极大畸变,这里应用最大熵原理估算频谱或进行反褶积处理时就显得格外重要。

有关最大熵原理的数学推导与论述的文献很多〔4、11、12、54〕,在此从略。下面仅仅引述能表明国内外在提高地震分辨率中应用此法实效的几个例子〔6〕。

(1) 用最大熵谱估算法来提高主频成分分辨率。

① 在小时窗下,与付氏变换法分辨率的对比一例(图14)

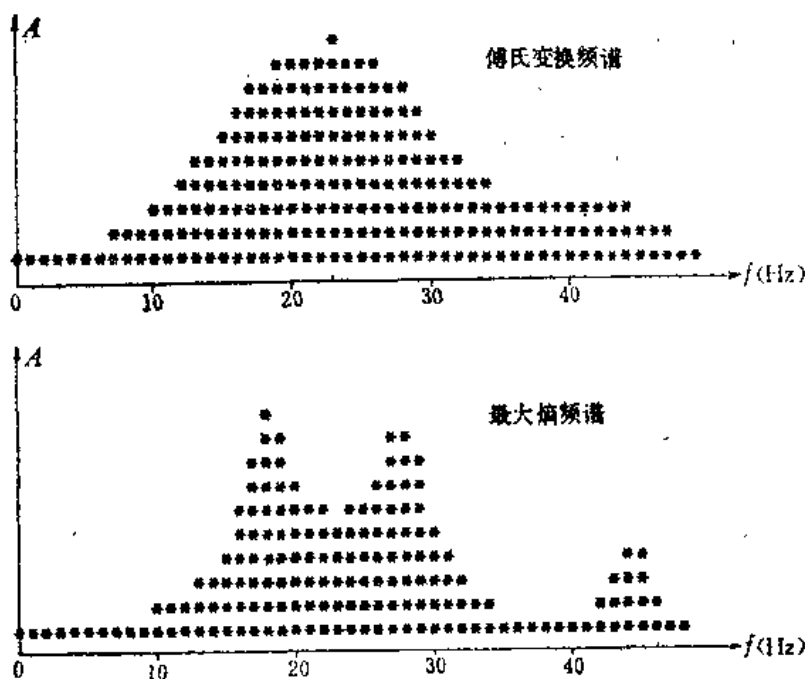


图14 付氏变换和最大熵频谱分析结果的对比(同一记录段)

用某段地震记录，以 100 毫秒时窗作频谱分析时，用最大熵谱估算法可以较清晰地分辨出三个不同的频率成分（18、28、45 赫），而付氏变换法却由于频谱受畸变（加宽），相互掩盖而无法分辨。

② 气层分辨实例（图 15）

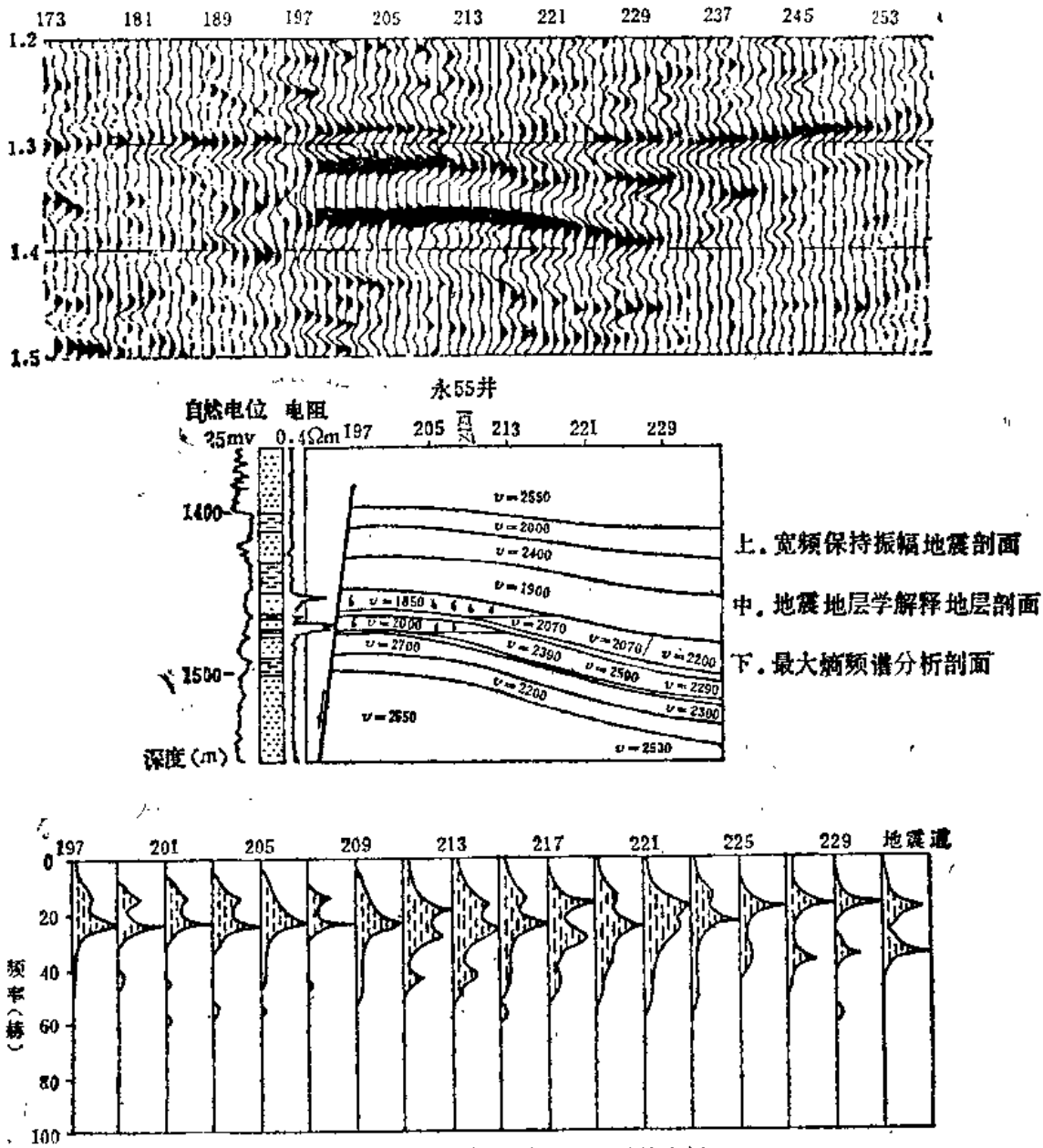


图 15 应用最大熵频谱研究气层的实例

在深度为 1450 米处两气层共厚 18.4 米。取 100 毫秒的时窗宽度，每隔一道记录作一次最大熵谱分析结果表明：在气层顶部频谱出现 14、23 赫二尖峰，反映了气层反射频谱偏低的特点与气层分布范围。而在气层尖灭处的气水界面之上，信号频率偏高，出现了 17、26、43 赫三个尖峰，这反映了气水界面的分布范围。这样的分辨率是付氏法达不到的。

(2) 用最大熵反褶积法来提高时间（纵向）分辨率。

首先要求对地震信息进行最小相位化处理，计算最小相位转换滤波器，从而提取最小相位化子波（为此可用测井反射系数和井旁地震道计算子波；也可用仪器响应对记录作最小相位转换等多种方法），然后根据已知子波进行伯格（最大熵）反褶积处理，其特点仍是假设

时窗外的数据具有最大的随机性。计算起始时窗内的 m 阶反褶积因子, 推算出 $m+1$ 阶反褶积因子并逐步提高阶值 (令 m 从 0 到达阶数 M) 就可求得 m 达阶数 M 时的正向预测误差, 也就是输出的反射系数。因此反褶积结果也就是反射系数剖面, 图 16 较直观地表明了最大熵反褶积处理后分辨率的提高。

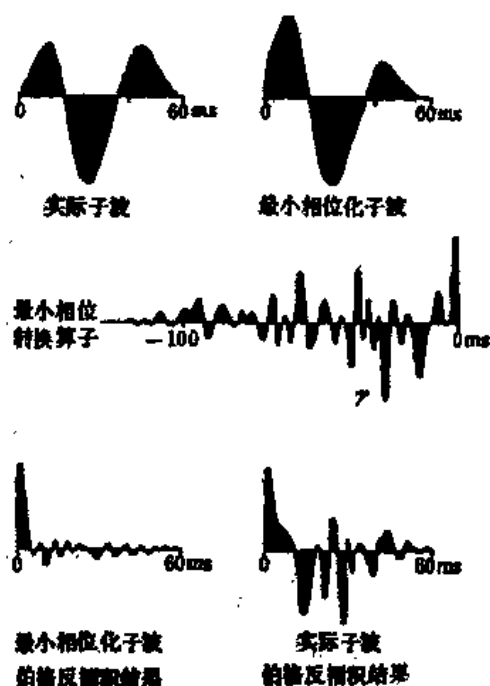


图 16 子波, 最小相位化子波、最小相位转换算子及其伯格反褶积结果

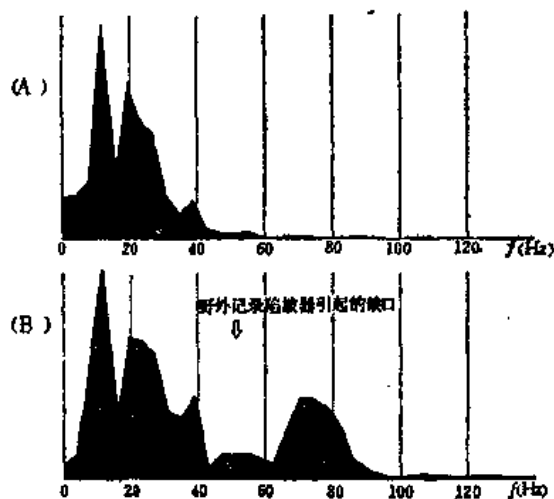


图 17 反褶积前、后频谱的比较

(A) 原始记录振幅谱

(B) 最小相位转换-伯格反褶积振幅谱

伯格反褶积还能较显著地恢复原始地震信息中优势信-噪比频带的高频成分受压部分, 经处理后使频谱成分向高频扩展到 80—90 赫 (见图 17)。

此外通过野外钻井资料取得的地质剖面图也进一步证实了用伯格反褶积处理后高分辨率地震剖面的正确性 (详见[6])。

尽管最大熵原理在地震分析中的应用在国内尚处于探索阶段, 处理时计算量大, 应用不多。但从文献中已可看出此法在提高分辨率方面也是很有发展前途的。

3. 波速分析对于薄层分辨的效益

地震记录上, 反射信息的分辨目前以时间因素为主。但近些年来, “波速” 因素在分辨薄层信息中的作用正在日益增长。

同时到达的反射波与干扰波 (如空气波、多次反射、面波与折射波等) 可以根据二者波速上的差别给予区别。因此, 提高求速精度并加强随着炮检距变化、旅行时变化及方向不同而产生的波速变化特征的研究将有助于地震法分辨能力的提高。

有关提高求速精度的文章不少, 在此只将与薄层分辨有关的论著引述一下。

(1) 薄层厚度的估算取决于薄层波速^[28]

为了估算出薄层的厚度, 不仅要求出薄层顶、底反射波旅行时间的差别, 还必须求得薄层波速。薄层波速可以依靠迭加速度随时间而产生的微弱变化推算而得, 也可以根据在增加炮-检距时所观测到的薄层顶、底之间旅行时差的增量推算出来。但是因为此增量总是随

着炮-检距的增加而逐步减小，层速估算的精度就受限制。理论证明，只有当岩层厚度超过一定数值 ($\geq L$) 时，才能正确地估算出层速与层厚来。

$$L = K \frac{\lambda_0^2}{\lambda_b}$$

式中： λ_b 为薄层中的主波长； λ_0 为盖层中的主波长； $K=5/(3\xi)^2$ ； ξ 为炮-检距与薄层深度之比值。

由此式可见，薄层波速愈低（这时 λ_b 下降），薄层速度就愈难依靠时差求得 (L^*)，见图 18 示意。而盖层波速如果低一些 ($\lambda_0 \downarrow$)、炮-检距相对目的层深度若大一些（但过度增加无益），也将有利于薄层厚度的确定。

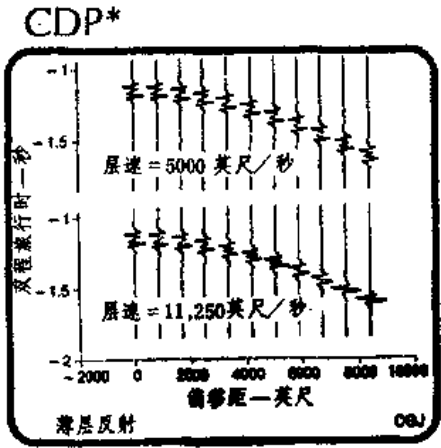


图 18 在盖层波速相同 (7500 英尺/秒) 而薄层波速不同 (5000 英尺/秒与 11250 英尺/秒) 时，薄层顶、底旅行时差随炮-检距变化的差异

此外，如果利用多道地震记录上有效地震信息相似的特点计算数个地震道上与不同迭加速度值相对应的“相似能量函数值”随时间的变化曲线图来，可以取得较高的抗干扰和分辨能力，并可从迭加速度随时间的变化，求出薄层波速与薄层厚度来。

(2) “薄层”产生的波速异常

Levin⁽²⁷⁾ 根据薄层模型实验与 23 口探井观测数据的统计性分析发现：当岩层的厚度低于地震波长时，就会出现波速横向异常（增大）。横波与纵波的波速异常值皆按下式计算：异常值 = $(V_{\text{横向}} - V_{\text{垂向}}) / V_{\text{垂向}}$ ，而且横波 (S_H) 的横向波速异常总比纵波更明显，从而引起横向泊松比值变化。

在层间波速与密度皆不相同，实验所得的 S_H 波横向波速可较其垂向波速升高 2.5 倍，而大量井中观测到的 S_H 波速异常常为 15-40%。作者曾经结合井下密度资料分析对比，表明密度变化对此影响不大。在 S_H 波速异常超过 10% 的情况下，大都与‘薄层’（层厚 6-60 米）的存在有关。纵波波速的横向异常值则较小，通常是 S_H 波速异常值的 0.4-0.6（有时为 0.2）。数据表明，薄层波速相对差别愈大，此异常值也愈大。在‘薄层’纵波波速偏高的地段，泊松比值偏低。从 23 口探井统计资料，得出以下规律（表 2）。

表 2

纵波行经每英尺厚度 岩层的运行时间(折算值)	泊松比值(σ)
<66 μ s	0.25
67—99 μ s	0.3
100—142 μ s	0.35
>143 μ s	0.4

作者 (Levin) 还归纳出了五个弹性平均常数用来表达由薄层构成的横向均匀介质的特性(从略)。

由此可以看出：加强纵、横波的横向波速异常观测及泊松比值变化的研究也将有助于薄层的发现与层速的估算。

(3) 利用‘伪声波阻抗’曲线可以预测井底以下薄层。

声波阻抗与岩性有密切关系。七十年代，人们利用地面地震观测资料反演所得的合成测井波阻抗曲线来预测地下岩性的方法不少，但往往由于震源子波频宽不够、噪声大等原因，限制了此法的分辨率。

近年来，随着多检波道 VSP 的发展以及各种采集、处理新技术的应用，大大提高了利用波阻抗曲线预测井底以下薄层的分辨能力。

新方法的优越性在于：

①采用了多道（11 道）检波的 VSP 观测，用小检距（~15 米）小组合（三点）记录，因此可用同一检波器录下入射波与反射波，有利于求得真实的反射系数。

②采用几个主频不同的震源，分别作记录，经过整形处理后再行迭加，借此就可大大加宽脉冲频谱，有利于波分辨。

③震源尽可能靠近井口，并选择钻井设备暂时挪开的时间进行观测，力求大大提高信-噪比。

④处理过程分为若干步骤：

(a) 用迭代减去法将入射波（下行）与反射波（上行）在记录上分离开来；

(b) 利用预测反褶积（维纳滤波）缩短入射与反射子波波长，以利分辨；

(c) 利用已取得的入射波设计整形滤波器，由以指数函数多重计算的入射波自相关来选择期望输出波形，然后将不同主频震源所得、并经整形滤波后的记录相迭加；

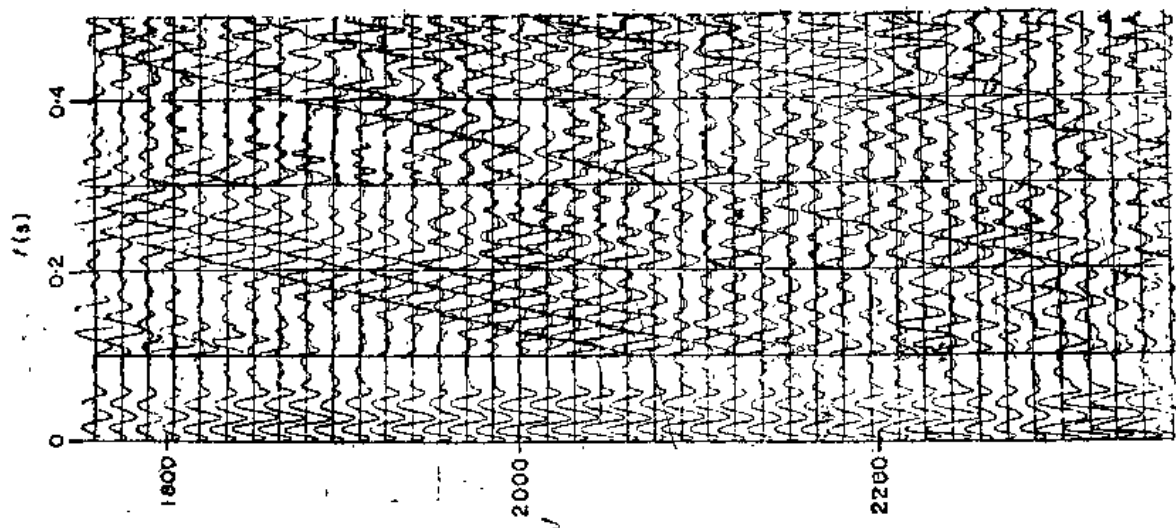
(d) 取得尖峰化脉冲地震图；

(e) 分两步将尖峰化脉冲地震图转化成为伪波阻抗曲线图：先准确校正脉冲记录的振幅，将视反射系数转化为真反射系数值；再依照反射和透视规律，按照层次向下推算出波阻抗曲线图来。

模型实验表明此法稳定。在噪声 < 5% 时，相似率可以高达 0.995，而当噪声 > 10% 时，尚不够稳定。

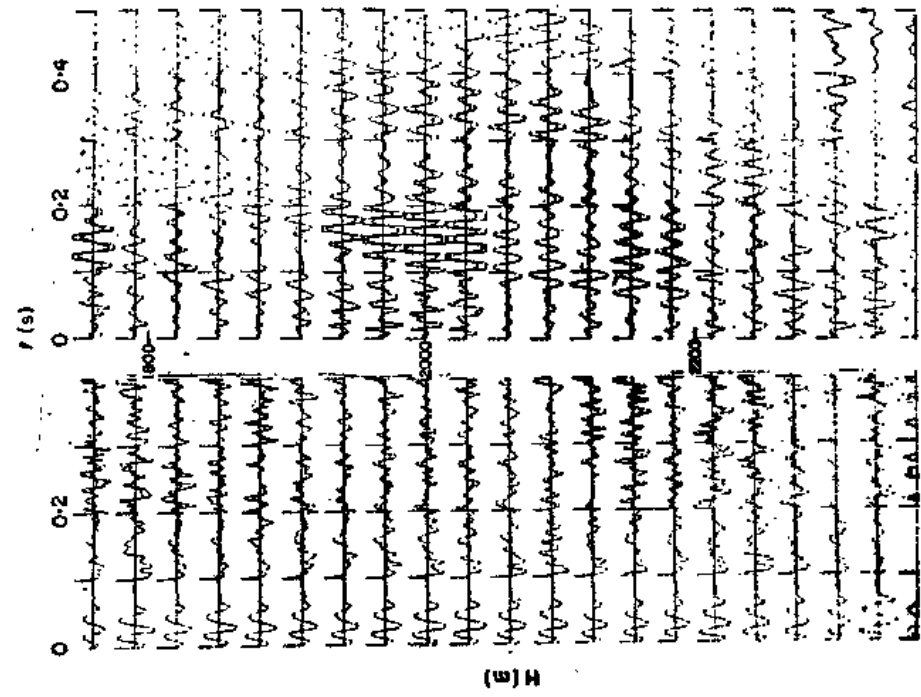
实际观测结果（如图 19 示意）表明，可以利用井中 VSP 资料换算所得的波阻抗曲线图预测出井底以下、二千多米深度处厚度仅为 12 米的硬石膏薄层（层速 = 6000 米/秒）的存在。

虽然上述几种方法尚处于探索阶段，已有迹象可见它们的发展前途。



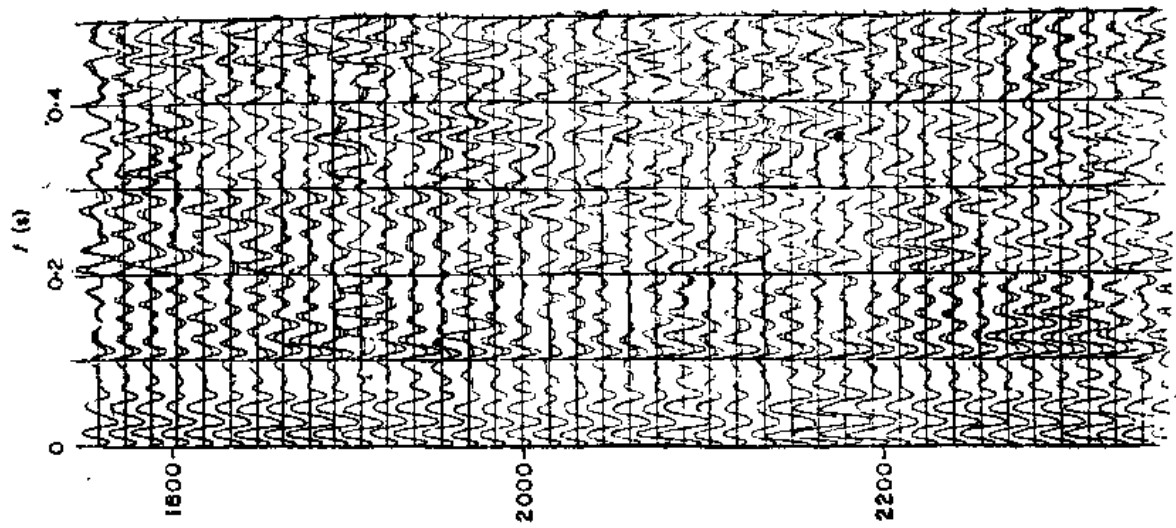
(A)

(A) 垂直剖面取得的原始地震记录



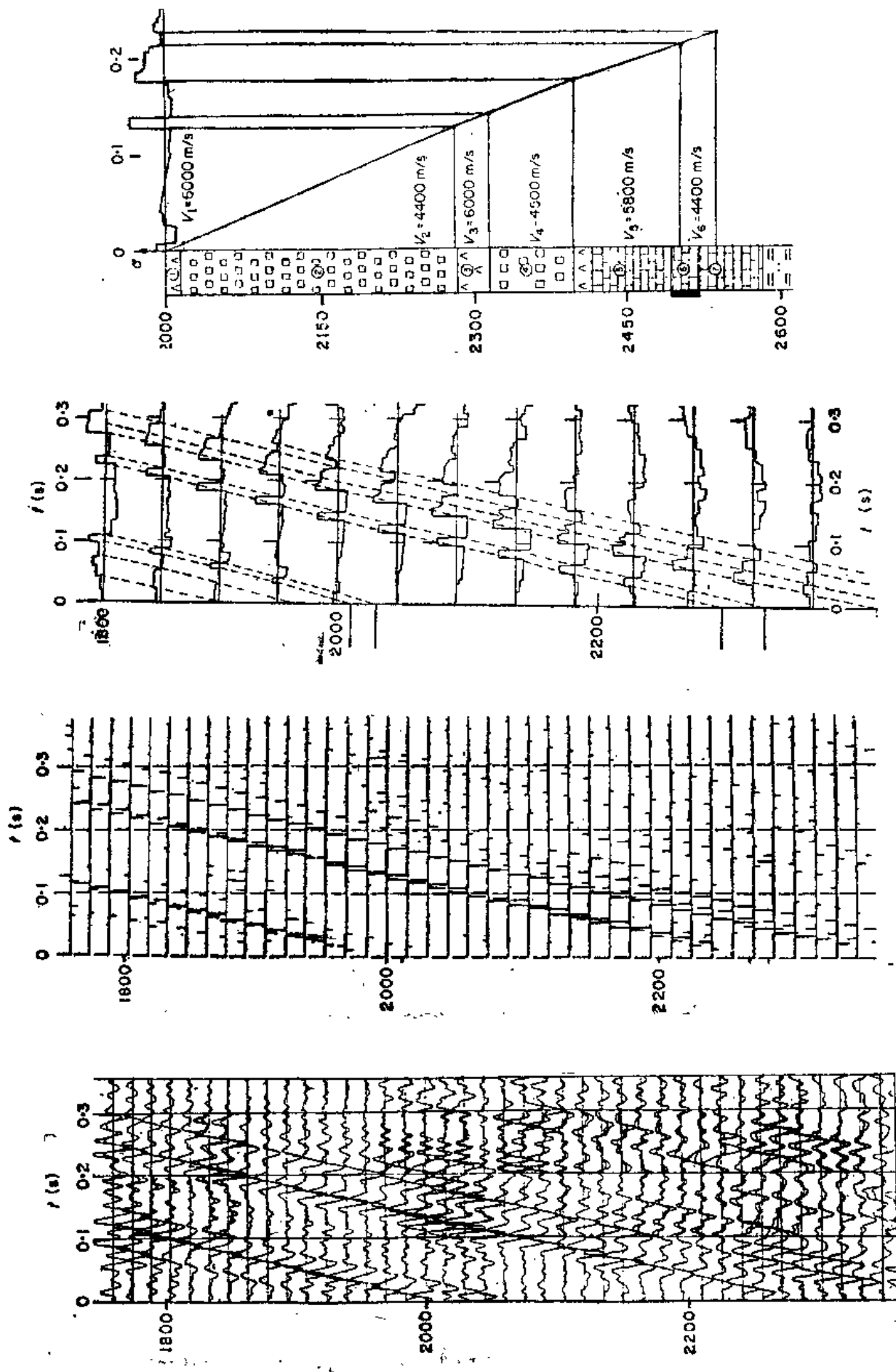
(B)

(B) 分离后的波场, 左, 入射波场, 右, 反射波场



(C)

(C) 预测反褶积处理后结果



(D) 整形滤波后结果 (E) 观测深度上的脉冲地震图 (F) 不同观测深度上推算所得声波阻抗曲线 (G) 声波阻抗数据的地质解释

图 19 利用VSP记录预测井底以下薄层一例

第二部分 实用手段

一、野外采集

尽可能提高原始地震记录的优势信-噪比信息的频带宽度与上限频率,取得高质量、小失真地震记录是提高分辨率的关键性一步。它是下一步分析处理的基础。因为任何先进的处理手段也只能在原始资料所取得的优势信-噪比频谱宽度的允许范围之内做文章,争取信号带宽最优化,而无法超越已有的限度。由此可见野外采集这一步的重要性。

影响优势信-噪比频带宽度的关键性因素是震源、大地与检测系统。近年来,国外针对高频震源、检波条件、排列设计、方向检测方法等技术问题进行了不少试验研究,取得一定进展。1983年美国在一秒记录深度可取得120赫的视频记录,苏联在西西伯利亚3公里深度,取得了视频为70—80赫的地震记录。

1. 高频震源

因大地对信号的滤波作用,要想加宽所录信号的频带宽度,加强震源的高频成分也是一重要措施。

国外高分辨率地震队常用的震源有以下几种,可根据本地的地表条件、地层特点与所有设备作出选择,必要时还可进行适当的试验对比。

(1) “小药量”迭加

炸药震源至今仍属宽频带地面震源中能量最强、应用较广的一种。震源产生的脉冲延时量与主频成分主要取决于炸药量(Q)与震源点的岩性,随其 V_s/V_p (γ)值而变。每炮数公斤以上炸药量产生的信号以低频为主,高频信息要靠数十克的小药量爆炸才能取得,又因岩石的 γ 值一般在0.2—0.4范围内变化,炮点岩性选择得好(置于泥岩中压紧)可使震源信息主频提高一倍以上。为补偿小药量之能量不足,可采用适当措施,如:

①简单的多炮迭加——可将60克炸药置于5—30米深的井下,两端最好用湿土柱堵塞(长15厘米)后起爆形成点震源。迭加前作好时差计算与波形校正即可加强高频信息,克服虚反射。合理选择大小炸药包分别放炮后迭加也可以加宽信号频带,提高分辨率。

②多股(1—25股)垂直导爆索震源(置于套管浅井之内)导索顶部加塞子,自上而下引爆时可以形成方向性强、破坏孔洞小、高频成分较高的震源(美SSI公司)。

③延迟型柱状炸药(Delaystick 1)^[61]以等深度间隔安置好一组炸药包,按照地震波速算出的时差,用导火索(fuse)依次引爆,可使下行波幅加强,频率升高,而上行波幅减

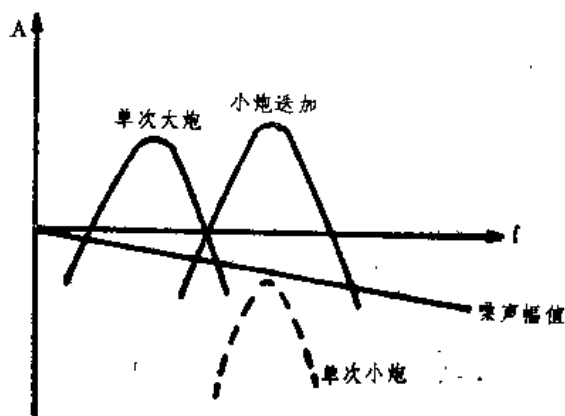


图 20 小炮迭加功能示意(震源脉冲的振幅与宽度皆与 $Q^{1/3}$ 成正比)^[62]

弱，频率减低，还可抑制虚反射。

在加拿大 Alberta 的西 Pembina 区一条 5 公里长的试验测线上对比观测表明，新方法（ 15×0.5 公斤）较之常规爆破迭加（ 8×1.0 公斤）所得信号频率提高了 15~20 赫，信-噪比值上升了 20 分贝，反射波直达前寒武系基岩，虚反射消失，并纠正了原先误判的一个‘异常’。虽然由于此法震源并深稍大等原因，费用较常规法约高 59%，但因地质效果显著，八十年代仍具有发展前途。

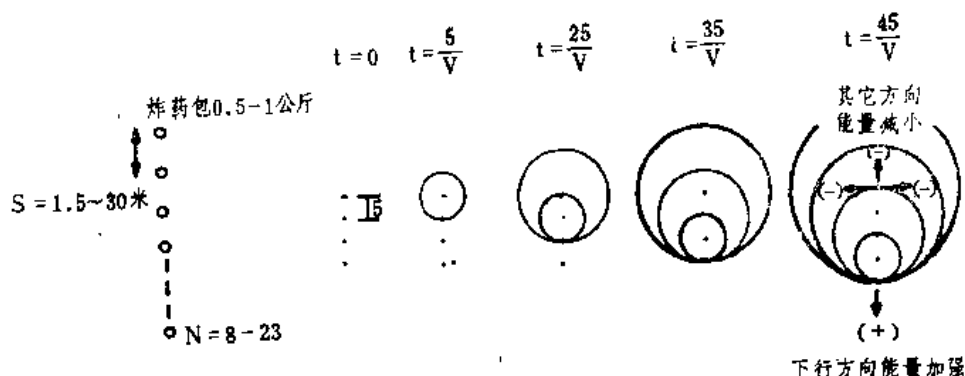


图 21 延迟型柱状炸药包功能示意

（2）高频可控震源—可控震源的特点在于具有较大灵活性，可以根据条件不同，由操作员任意选择不同的参数、函数，通过电路（所谓“万能扫描器”）控制震源参数，使产生非线性扫描（包括对数函数、幂函数及其它任选函数）；或者选用频段不同、振幅任选、持续时间不同的信息，使高频信息得以加强。目前新型高频震源应用较广类别较多（如 RCV/SHV-410 型等），各具特色，但其共同之处在于：底板质量较轻，共振频率较高（2500 磅的底板仍可产生 50000 磅的驱动力）、底板弯曲度减小（低于底板作 200 赫振动时位移幅值的 30%），依靠增大活塞面积、缩短冲程、减小封闭流体量，还可提高液压流体的共振频率。

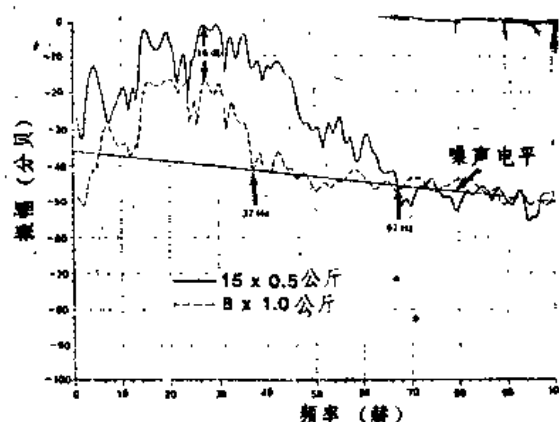


图 22 延迟型震源实效一例示意图

1983 年法国在一气藏上利用 $f = 20 - 200$ 赫、扫描时间 10 秒的非线性可控震源（ $f(t) = 20 + 83.5\sqrt{t}$ ），配合 10 米内 9 个检波器作矩阵、进行 24 次覆盖，可使信号频率朝高频提升 30 赫，在 700 米深度下取得了 <10 米的分辨率。成功地跟踪了上、下二气藏间一页岩薄层（厚度~7 米）。并探出其厚度变化。

利用可控震源震相可控这一特点，还可有效地将其应用于“交替激发”新技术中去。“交替激发”（Stutter shooting）技术^[60]。是以一定时间间隔（~数毫秒）与振幅极性关系，先后激发震源若干次（一组），就可使所获目的层子波频谱朝高频增宽、子波变窄、分辨率加强。

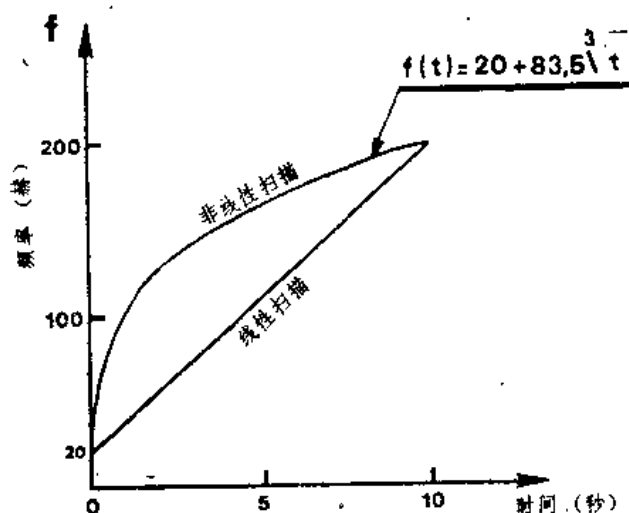


图 23 非线性可控震源扫描特性示例

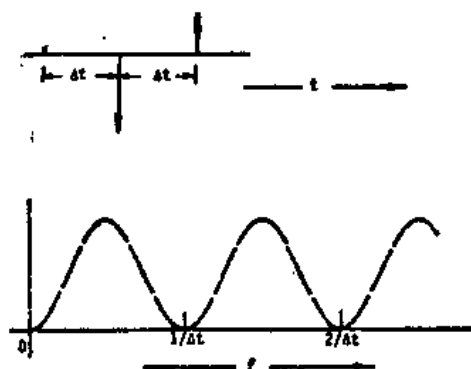


图 24 三点异相式“交替激发”的时延、振幅极向关系与其频谱特性

举一实例说明如下：

为了取得例中的异向震源激发，可设置三套可控震源，以 6 毫秒为间隔先后激发，并要求中间震源具有相反极向，加倍振幅，就可使所录目的层子波分辨率提高 ~ 2.5 倍。随着研究、试验深入发展和地质条件不同，还可寻找出分辨效率更高的多种阵式激发方案来，详见^[60]。

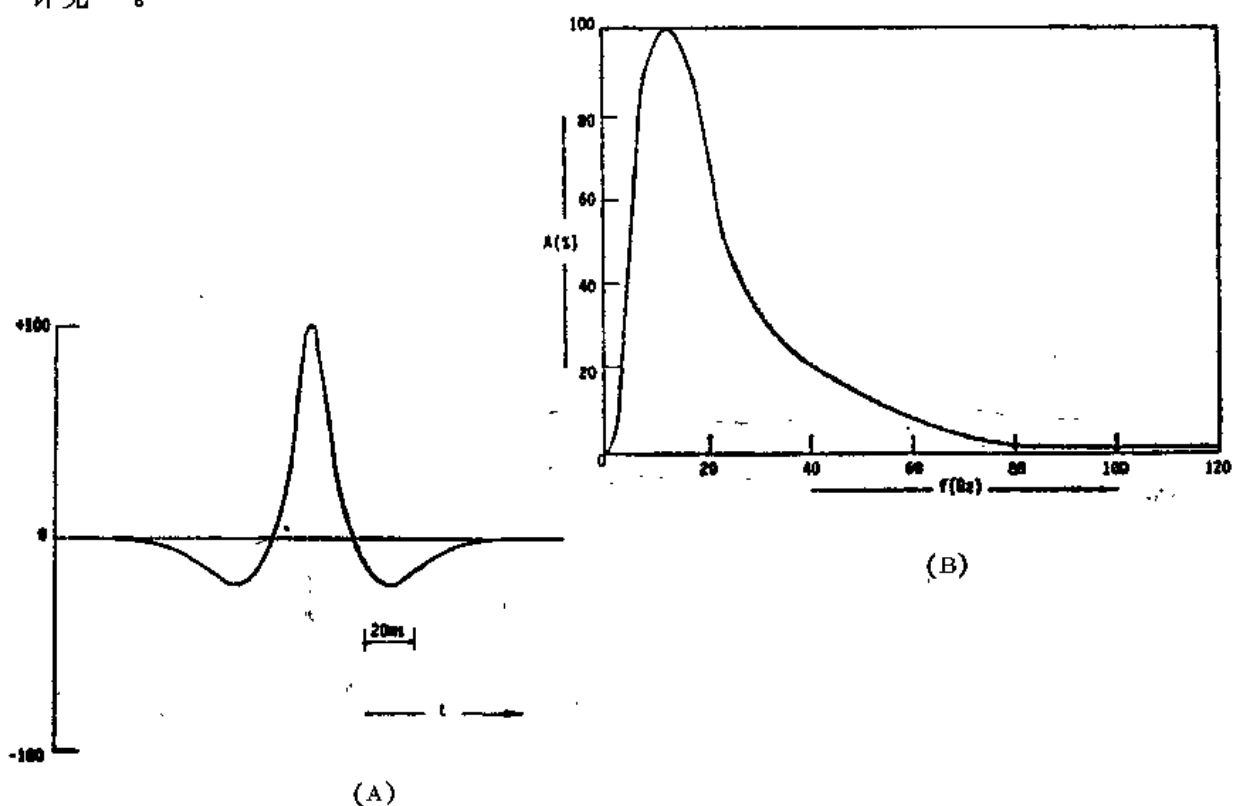


图 25 单震源目的层子波波形 (A) 与频谱 (B)

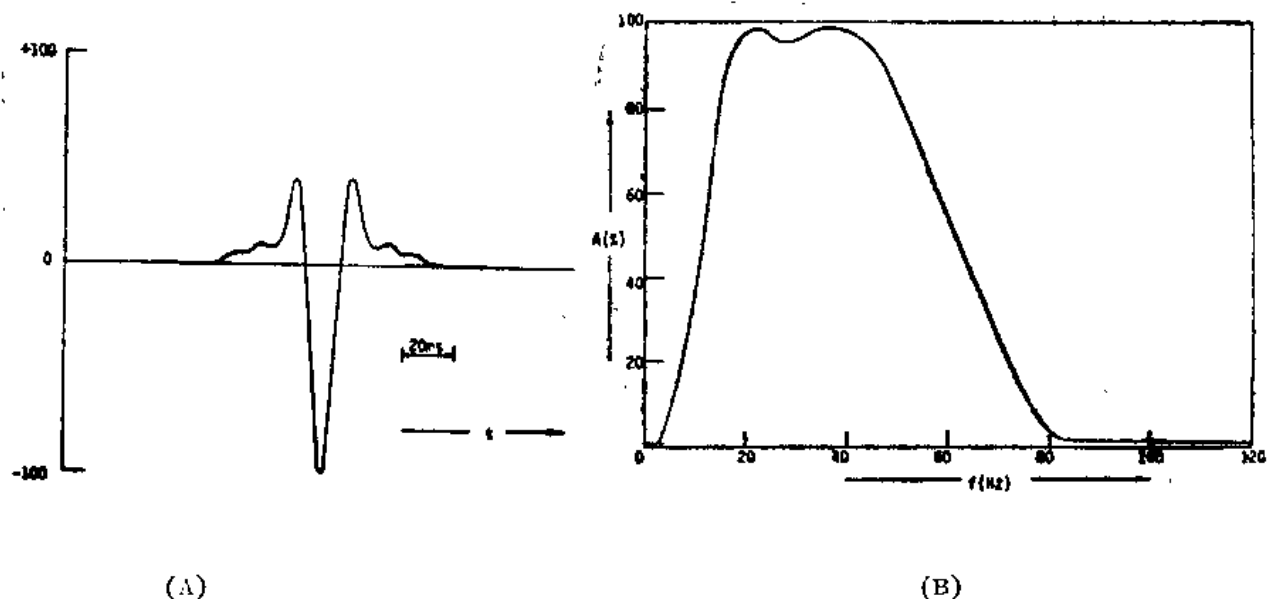


图 26 在令 $1/2\Delta t = 80$ 赫 ($\Delta t = 6$ 毫秒) 时, 三点异相式阵状激发所生目的层子波波形 (A) 与频谱 (B)

(3) 陆上空气枪—它是由海洋气枪发展而来的, 其特点是: 重复性好、起爆时间准确、波形波谱稳定。美 Bolt 公司生产的 LSS-3 型气枪可以取得 2 秒的纵波反射层信息, 在高分辨率资料采集中已成为一种常规工具^[34]。

利用其起爆准确这一特点, 美 SSC (地震服务公司) 还设计了一“凤凰”软件系统, 称为“射线转向控制” (beam steering) 的程序, 用它产生一时间扫描信息, 按照一定时延规律依次启动一连串震源组合, 能使震源激发的地震波具有明显的方向性, 与铅垂线形成不同交角斜向射出, 以取得最佳反射效应。这种技术能够提高信息的频率成分和信-噪比值, 在界面倾斜、岩性微小变化与寻找浅层构造时具有较高分辨能力, 已在墨西哥试验成功。

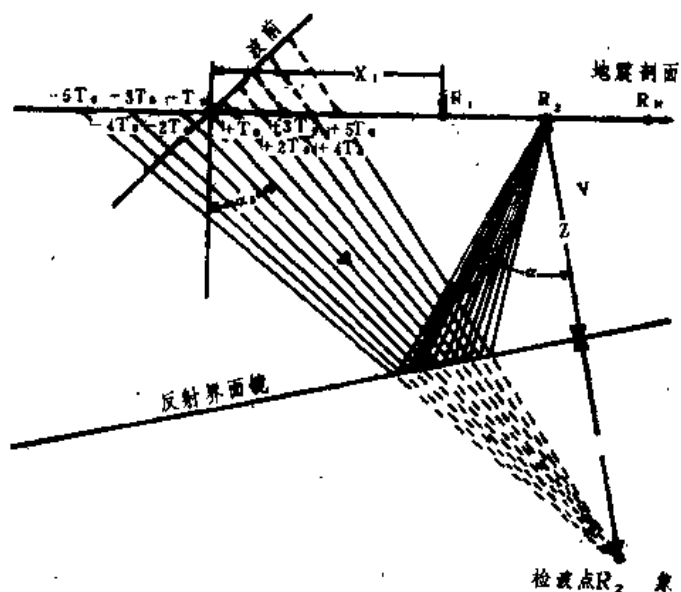


图 27 射线转向控制系统示意 (具时延的 11 台可控震源组合)

2. 检测系统与排列设计

(1) 检波条件

对检波器的要求是：寄生频率高（寄生振荡频率大于 200—400 赫），非线性失真度小（ $<0.05-0.1\%$ ）、动态范围大（ >170 分贝），为保证与地偶合良好（使偶合谐振频率高于 120 赫）要求垂向检波器具有较长尾锥，插入坚质泥土中埋好，水平检波器（横波勘探法用）则应埋藏得深一些、压紧。

1982 年 Delft 大学的 Klaassen 与 Peppen 共同设计的电子式加速度型高分辨率检波器（ADR-711 型）频率和相位特性可调，其结构的特点是：线圈固定、而磁性极强的钴-钐（Co-Sa）小体积磁系统作相对运动，外加一电子放大器将检测线圈的电压放大的后电流反馈给磁体的驱动线圈，使其返回原位。这使得相对运动幅度极小（近于不动），因而可使用硬质弹簧、工作在任意方向。这种检波器的频响（当质子运动速度不变时）如图 28 所示，高频端灵敏度直线上升，可以补偿大地对高频的滤波效应，适于在高分辨率勘探法中使用（详见^[82]）。

(2) 排列设计

排列的合理设计包括最大炮检距的确定，时、空采样间隔、组合检波的合理选择及对震源频带的合理要求等内容。设计合理与否直接关系到求速精度、动校正精度、信-噪比值、波形失真大小、动态范围的充分利用程度，以及经济效益的高低等。因此，是一项需要综合考虑周密计算的重要工序，为提高地震资料的分辨率，在地质情况不详的勘探区，甚至有必要进行一系列预测性试验，如：微测井（求波速）、小折射（测风化层）、干扰波调查（求噪声频谱）、组合检波、小药量组合爆炸、覆盖次数的效果等项试验，才能作出精确合理的排列设计。

(1) 最大炮检距的选择

炮检距过小会降低求速精度，过大则会降低动校正精度。根据目的层上、下波速比值不同，还需考虑选择适当的入射角值，方能获得最佳信-噪比。因此需要首先按照当地的平均速度函数式： $V(Z) = V_0 + aZ$ ，根据所拟定的求速精度 ΔV （一般取 100—150 米/秒），与

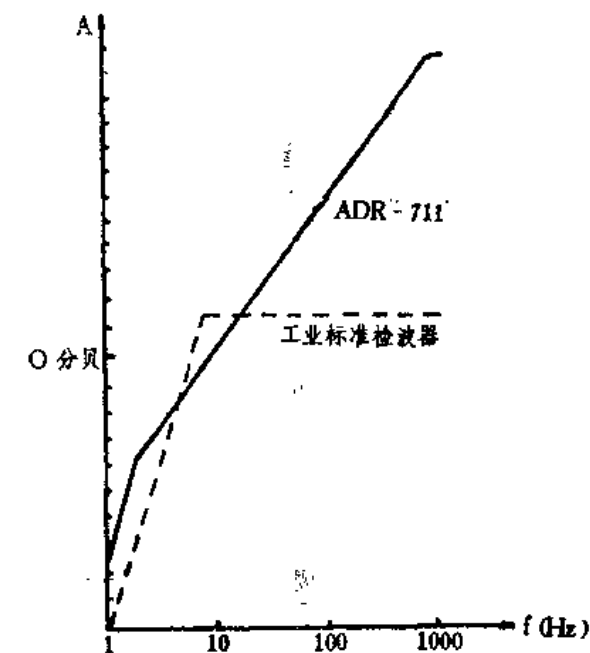


图 28 电子加速度型高分辨率检波器
(ADR-711型)频率响应特性

校正拉伸度值 ΔNMO （一般取 30%），计算出炮检距与双程记录时间的关系曲线图来。再依照目的层所在的时深范围，便可估算出最大炮检距的选择范围来。

选择的炮检距必须大于临界炮检距，否则无法满足求速与动校正的技术指标。要求的分辨率愈高，临界炮检距愈小；目的层愈深、最佳炮检距愈大，选择范围也相对增大。

从提高信-噪比值的角度来看，还可根据目的层上、下波速比值不同，选定最佳入射角（ θ_0 ），然后参照勘区目的层以上均方根速值（ V ）风化层速（ V_0 ）、目的层双程旅行时（ T ）及目的层最大估计倾角（ θ ），进一步验算出最佳炮-检距 X 值来。

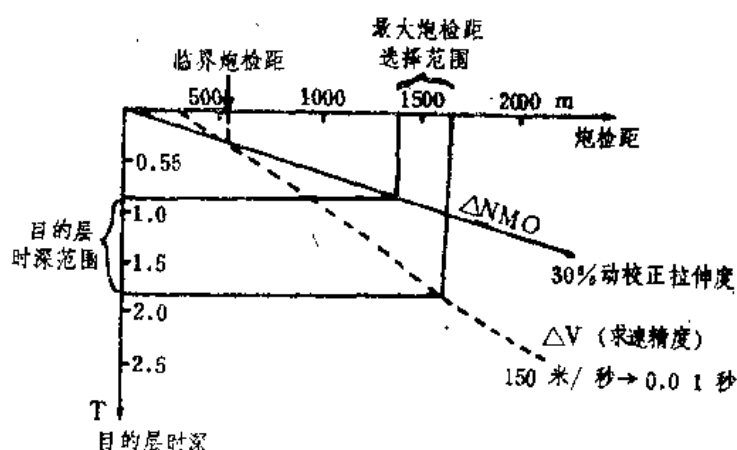


图 29 最大炮-检距的选择示意图
(曲线计算方法可参考油气勘探译丛83.1)

$$X = \frac{TV^2}{V_0} \operatorname{tg}(\theta + \theta_0)$$

参照前面估算出的最大炮-检距选择范围,即可确定一合理的X值。一般此值不会超过目的层的最大深度。

(2) 时、空采样率与组合检波的设计

空间采样值 ΔX 可根据信息最高频率,平均波速V,及目的层最大倾角 θ 值,再结合经济实效,就可确定下来。

$$\Delta X \leq \frac{V}{2f_2 \sin \theta};$$

在 $f_2=233$ 赫 $\theta=15^\circ$, $V=700$ 米/秒时, ΔX 可取 <20 米即可。苏联经验表明^[31]为了提高横向分辨率,在炮-检距为1.2公里,目的层深2公里时,检波器组合距只能 <20 米,检点距10—20米时,才能获得稳定的120赫信号记录,因此使用多道地震仪(>100 道)更有优越性,时间采样率: $\Delta t \leq \frac{1}{4f_2}$;即可(当 $f_2=233$ 赫时, $\Delta t \approx 1$ 毫秒)

组合检波是人们熟悉的方法,其目的在于利用信息与噪声之间具有不同的方向特性(即视速度的不同),来排除面波和其它低视速干扰波,提高信-噪比。在高频地震中,为了更好地加强近垂向的高频反射信息,除去采用小组距的水平加权检波器组合而外,还可以利用井内震源(或检波器)进行垂直加权组合,使具有三维的方向选择性。(水平组合是二维的)。这对于增强定向高频反射信息具有特殊功效。为合理选择组合参数,使在最小复盖数下取得最佳方向性与工作稳定性,最好事先能选择有代表性的地区作些试验,查明反射波谱与噪声谱(视波长范围)的差异,并通过试验观测对比来确定检组距、组合检波器数量与加权系数等。

(详细方法见[39])

(3) 对震源频带的合理要求

高频震源信号的频带并非愈宽愈好,必须考虑到实际效果。要根据观测系统的动态范围

大小和勘区对不同频率信号的衰减规律不同,估算出合理的频带范围来。波前发散引起的波幅衰减与频率无关,而是主要取决于目的层时深(T)与均方根速值(V):

$$\text{发散衰减(分贝)} = 20 \log \frac{1}{TV^2};$$

地层吸收引起的波幅衰减则主要取决于信号频率(f)、地层吸收因子(α)及双程旅行时间(T):

$$\text{吸收衰减(分贝)} = \alpha T f;$$

吸收因子(α)虽难预测,但是根据前人的可贵经验,已证实:随着时深增加、土质由松变硬, α 值也下降。因此可以令: $\alpha T = \text{常数}(0.3)$,这样就可以根据不同频率信号的衰减规律(如图30示意),估算出对震源的合理频带要求来。

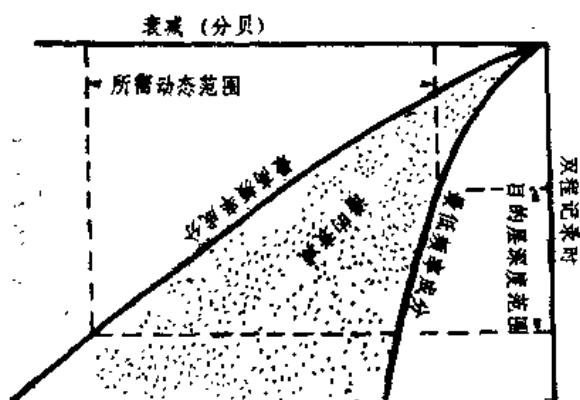


图 30 震源频带的选择方法示意

举例说明:设系统动态范围为80分贝,目的层介于1.0—2.0秒之间,求得发散衰减因子为9分贝,信息频带范围内的最大允许衰减范围就是71分贝(80—9),设带宽下限 $f_1 = 14$ 赫,则可算出,实际可以录下的上限频率 f_2 就是233赫,因: $71\text{db} = 0.3(f_2 - f_1)$

$$f_2 = 14 + \frac{1}{0.3} 10^{71/20} = 233$$

经反褶积处理后,主频将是124赫。

如果采用分频段扫描利用大、小药包分别记录或非线性扫描的办法,也可以利用动态范围不大的观测系统取得频带更宽的信息,但是这会降低地震队的生产效率。

二、高分辨率分析处理方法

在取得宽频带优势信-噪比值、小失真的原始地震记录之后,就需要运用合理的分析处理方法从中取得最佳地质结果。已有的手段方法很多,效果往往因地而异,现择取一些近乎公认的观点与几种广泛应用的高分辨率处理方法,简述于下:

1. 常规地震处理流程中的几点特殊要求^[31]

高分辨率资料的总体处理流程与常规资料相仿。然而在若干重要环节上还需要提出一些特殊的措施、指标和要求。为达此指标,必要时尚须进行一系列补充性观测:如浅井网观测、小折射法剖而记录等,以取得必要的信息资料。特殊的指标要求有:

(1) 减小波形失真

理论分析与实践皆已表明:波形与其真幅值的细微变化往往是识别薄层、小砂体和岩性局部变化的得力手段,因此在处理过程中尽量避免波形失真保持幅值真实是提高地震法纵、横向分辨能力的一项重要条件。

常规地震处理中,为进一步压制噪声、排除多次波及其它规律性干扰,往往采用频率滤波器。在高分辨率信息处理中,为防止频带宽度受损和一次反射波畸变,应当尽可能禁止使

用频率滤波器。为排除干扰,苏联常用的是所谓“最佳多道滤波”,以及“对应相减法”(Адаптивное Вычитание)来排除多次波干扰(可使衰减20—40分贝),同时又可保持一次波不遭畸变。

(2) 提高静校正精度

为了保持高频成分不受损失,要求大大提高静校正的精度(精达0.5—1毫秒)。这只有分别在高、低频带研究静校正和迭加速度,利用初至波作静校正或是依靠迭代循环的方式进行自动静校正处理,才能不断提高其高频极限。对低频成分进行静校正的精度也要求增高。实际勘探表明,低频静校正精度不高时,纵然不能影响反射波的跟踪质量和 t_0 线的形状,却能使波形显著畸变,甚至会产生 >10 分贝的假振幅异常。目前国外常依靠观测补充浅井网(100—200米)的结果来提高静校正精度。

(3) 动校正与求速精度的提高

动校正处理不当往往也会引起信号波形畸变频率变低。为减小这种畸变,苏联采用了一种“块状动校正”的处理方法并减小绘制共深度点剖面时与求速时组合迭加的组合长度。特别要求大大提高共深度点的迭加波速值(V_{ORT})精度, (使达0.5—1%)才能以高精度($<3-4$ 毫秒)推算出动校正值来。这里要求采用的速度分析法既要稳定可靠又具有较高的分辨能力,可以采用非线性算子与 V_{ORT} 速度水平谱多道滤波的方法来进行。

此外,在高分辨率处理过程中,对于反褶积与偏移技术也有其独特的要求(见后)。

2. 苏联地震“高分辨分析处理方法”的一些特点

除去上述对常规处理流程中若干指标的特殊要求之外,苏联目前正推广使用的一套高分辨处理方法还具有以下特点:

(1) 重视动力学的分析

苏联近年来十分重视地震动力学信息的充分利用。其中重要一环正是动力学特征在提高分辨率方面的独到功能。

为此,首先要清除或根本减小地表、仪器、波场与深层因素对波幅的综合影响。依靠研究与利用动力学综合处理的特殊技术,并要求运动学处理过程中也尽量减小动力学参量的畸变。苏联现已建立了一套较成熟的动力学处理方法,并采用一系列最通用的处理程序(如ЛИНПАК,包括保存幅值的程序在内),对大量高频地震信息进行分析处理。

动力学分析方法中目前有两种不同的做法:一是在假设反射系数(K)稳定的前提下,确定记录强度的衰减;另一是对扩散因素、界面曲率、激发与接收条件以及影响频率的衰减因素等进行一连串的补偿。

完整的动力学综合处理方法是将此两种手段结合起来,并在高频地震的基础上将所含矿体、界面形状、薄层与其它会影响地震波形的因素皆考虑在内。

当前,即使是在结构较为平缓的地台区,在作高分辨率地震分析时,也不能将介质简单视作平行或小倾角的层状界面。因为在一组平行的薄层内也常会出现物理性质陡峭变化的界面和曲面(如西西伯利亚白垩纪沉积内的岩相体在剖面图上就显示得很象一些挠曲形的褶皱)。因此必须将地震波的微小偏差也考虑在内,使保证能够补偿掉由构造因素引起的波动动力学畸变。现用偏移方法还可使波幅沿剖面与反射系数的分布相对应并改善信息的分辨能力。

在用模型试验来评价剩余畸变量时(在偏移后的剖面上),曲面产生的波幅畸变,即使在应用现代化技术后也可能达到200%以上。因此必须继续努力研究改进偏移方法,使适应动力学处理任务的要求。

在研究波的动力学特性时,还必须估计到地震信号相位特性沿测线的变化,并根据它来设计剖面上的记录滤波器。最为经济的办法是直接从处理好的记录上确定信号的相位特性。陆上勘探的实际做法有二:①求出数十个地震道内一段记录的模拟加权函数的平均相位谱。在震源与检波点条件多变的条件下,此法应用受限。②为了排除薄层的影响,地震道内的相位平均值可按时域分段来取,首段可由有效地震模型取得,此法可以减少所需平均段的数量,但是未见严格论证。信号波形的恢复还可通过综合利用地震与测井资料来解决:在剖面的关键点上,选择一口浅井(<100 米),在此井内进行观测,以此校正直达波记录(由此可以估计出高频地震波的吸收率与伴生波对它的影响)。还可用来估价地震信号的波形,并推算出合成反算子。事实证明,在地层厚度超过20—30米的地区,用此法推算出来的速度模型与声波测井资料相符甚佳。

(2) 地层反褶积处理法(CП)

在取得高分辨动力学剖面以后,利用反褶积处理能进一步扩展子波频谱、消除信号的剩余相位成分,使得子波经最佳整形后,更有利于分辨。在苏联反褶积变换一般分三步进行:

先为补偿记录系统内记录道的滤波作用进行一次反褶积;再根据浅井所录下行波波进行反褶积处理校正成零相位波形;最后进行一次地层反褶积(CП法,或称零相位反褶积法)。

地层反褶积主要依靠声波测井资料求得反射系数序列再与井旁地震道记录反褶积求子波。

CП程序中主要利用一维纳滤波算子。它能使得共深度点时间剖面内的一次波单道脉冲最接近深井道计算所得。通常是整个时间剖面使用同一算子,借此从地震记录取得最近似的伪脉冲反射系数图。在复杂地区,如横向与垂向地质结构多变或在互薄层内存在多次波的情况下,则需采用随时(t)与随源-检距(x)面变的合成反算子对地震资料进行反褶积处理。这时必需掌握更多的深井资料,将地震波行经深层条件下所产生的波形变化也考虑在内,才能作到。

与建立伪声波测井剖面的旧方法比较起来,CП法具有以下优点:

①不一定要掌握震源波形,并要求它沿剖面保持不变;②信号波形校正十分严格,在区别不同地表与深部因素的问题上不能通融,但与波的反射角、折射角则无关;③处理时可以同时求得优势信-噪比的频带宽度,并可准确定量求出反射系数。

此法通过相当复杂的模式例证,表明薄层层速与厚度恢复误差近6~13%。在西西伯利亚Шанмск地区此法已经验证。根据多道恢复的反射系数及由此推算出的声学剖面,成功地取得了产油层的尖灭图。将反射率图推算出波速图后,还可详细研究个别薄层(10—15米)区范围内的层速变化细节。与井联系起来,还可预报互薄层组内的岩性变化(结果见后——“勘探实例”)。

(3) 地质化解释

首先是根据高分辨地震道的反射率函数值(伪脉冲)确定互薄层的物理特性。

最常用的方法是将伪脉冲转换为波阻抗曲线,即所谓“伪声波测井剖面化”——这是接近声模型的第一步。也是在解释初始阶段内的地震剖面第一步“地质化解释”。其优点在于:它能把地震道动力学与共深度点数据处理运动学中所包含的波速资料成功地联结起来。因运动学校正精确,借此可以恢复波速剖面中的低频成分。

更有前途的第二种解释方法是“介质模型选择法”(ПМС)。首先根据深井的声波测

井 (AK)、垂直地震剖面法 (BCП)、 γ - γ 测井 (ГГК) 资料组构成一薄层剖面模型, 使合成地震道与近井地震道所得图象相似, 然后从近道逐道向远道推, 逐步改变模型, 选择有效参数, 使合成道与实际记录符合最佳。此法能充分利用地质观测井 (ГИС) 的已有资料, 建立起介质的模型雏形。模型内所用的薄层最小厚度要取得与实际分辨率相适应, 由此还可促使动力学反演中不正确性问题的正确解决。

在西西伯利亚东 Гарасовский 地区, 利用 ПМС 法进行详细研究以后, 取得了产油层复杂结构的速度分布状况, 并沿测线预测了岩性变化 (详见后)。

ПМС 法的下一步发展方向是:

(1) 进一步将 ПМС 法扩展应用到非水平层状的介质中去; 2) 研究出一种能够模仿海洋升降的措施 (建立在数学模式的基础之上), 来提高参量最佳化的相似程度; 3) 研究出一种方法, 使可沿着有效模型的同一界面, 自动建立起声波阻抗的剖面细节来。

3. 几种有效的反褶积处理方法^[14]

反褶积是褶积的逆过程, 可以抵消震源脉冲在传输和记录、处理过程中所遭受的一系列畸变 (包括反射率函数、多次反射、仪器响应等因素对震源子波的褶积过程)。

三十多年来的实践表明, 反褶积处理已成为子波整形、提取地下反射率函数和压制多次波干扰, 提高地震记录分辨率的有效手段、处理过程中必不可少的重要一环。已有的方法类别繁多, 仅名称不下十余种, 如按方式方法命名分类, 有地层反褶积、动力预测、最大熵、构造、预测及同态反褶积法等。也有按照所用范数多少、理想输出形态不同和未知数已知程度不同来分类命名的 (详见文献)。在此结合具体需要, 选取效果显著的作一简介。

1. 子波整形反褶积法 (Wavelet Shaping Deconvolution) 此法采用平滑子波能谱的方法。根据原始地震子波的波谱形状, 尽可能提高高频成分, 使子波主瓣周期缩短; 扩展低频成分, 以使子波旁瓣相对幅值减小 (令 $R=A_{\text{主}}/A_{\text{旁}}$ 值降低), 并使振幅谱保持一平滑的曲线形状, 取得零相位子波输出。成形反褶积计算子波成形滤波因子时应用的是最小二乘方原理, 处理流程大致如下:

输入源子波→设计所需输出子波→解常规方程, 计算滤波因子→计算输出道及误差→寻找最小误差及最佳滤波因子→输出滤波后子波及滤波因子。

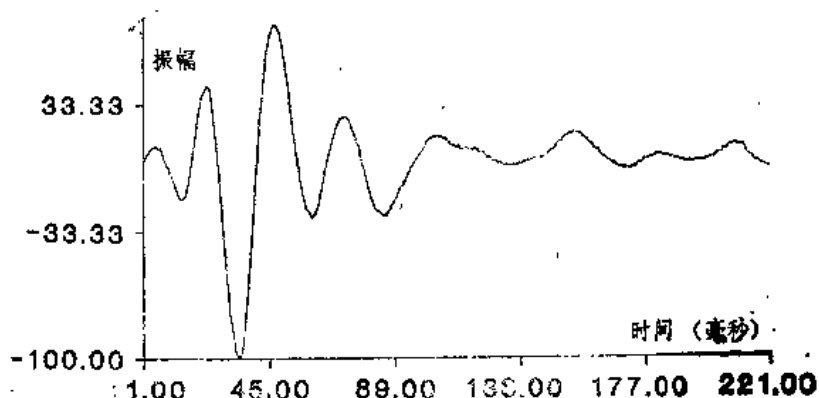
设计滤波因子时要试验三种不同参量: 所需输出子波长度、滤波因子长度及噪声电平。

赖斯 (Rice) 曾通过雷克子波的实验说明, 反褶积 (滤波) 因子的长度取得与输入子波相当时, 可使输出子波的主瓣宽度缩短 $\sim 1/2$ 。因此, 一般滤波因子长度取得与输入子波相当, 即可满足要求。为了减小由于频带加宽所引起的高 S/N 频带范围以外的输出噪声过分放大, 需要根据原始数据信-噪比值的大小, 在处理之前预先加入一定的预白化噪声, 使得此白化噪声接近地震信号内已有的周围噪声大小。实际所取预白化噪声的具体比值常是根据需要在压制高频噪声与脉冲压缩程度二者之间作出折衷选择, 一般取得不高: $<0.5-1\%$, 因为过大会改变子波相位谱, 使子波分辨率受损。最大 10% , 就会使极性反转。

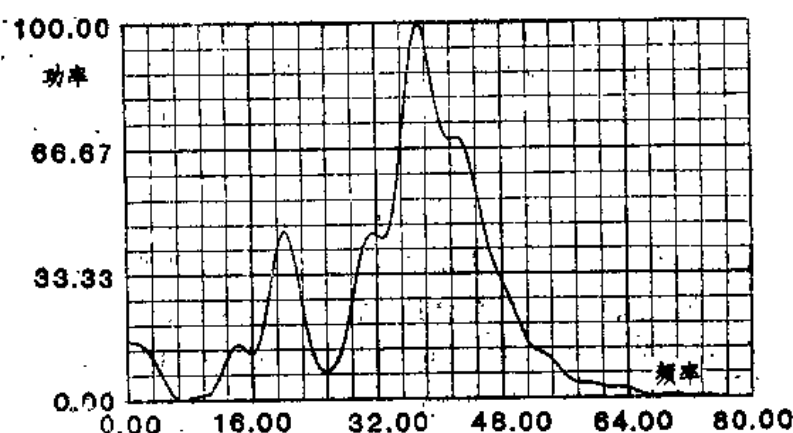
以一极差子波波形为例: 输入子波长度 221 个采样点, $R=0.753$, 频谱较窄, 且畸形。

取平滑反褶积滤波因子长 201 点, 通过 24、34、45、56 赫频点进行平滑增宽处理后, 取得 49 点长度的理想输出子波 ($R=0.483$, 最小误差 0.008) 及其频谱如图 32 所示 (无预白化噪声加入)。

这种平滑能谱的做法与尖脉冲 (Spiking) 反褶积法过分加宽频带、不顾谱形畸变、以致引起更大噪声的做法相比, 具有更佳的分辨能力 (有楔状体实验为证, 详见文献[64])。



(A)



(B)

图 31 子波整形反褶积法一例

(A) 原始子波波形

(B) 原始子波波谱

(2) 去相位反褶积法

这也是一种较常用的子波整形处理方法,其特点是严格保持原始地震子波的振幅谱不变,只调整子波的相位谱使为零或取得最小相位的理想子波。它在相同振幅谱的子波中分辨率将最高,而且处理后的地震剖面图上信号峰值所在就是反射波的到达时间,便于解释。

子波大体有三方面来源:现场测得的震源子波、实验室测得的记录系统脉冲响应以及根据已知反射率函数求得的子波。

为设计去相位反褶积因子,通常采用两种方法,即频率域内的沃德-科尔莫果洛夫因式分解法和时间域中的最小二乘方法。前者更为简单常用:根据原始子波的相位谱 $\theta(\omega)$,可以求得频域内反褶积因子的频谱为 $A(\omega) = e^{-i\theta(\omega)}$;从 $A(\omega)$ 不难用付氏反变换求得反褶积因子 a_t ,以此处理原始记录,即可达到去相位的目的。可以对地震观测子波或仪器的脉冲响应作这种整形,也可以在脉冲或预测反褶积以后或频率域反褶积前后进行。

下图给出一合成之例。原记录是一个相位畸变的长鸣震子波,经去相位反褶积处理后,分辨率显著提高。

又一例是实测剖面,经去相位反褶积处理以后,反射界面比原剖面的连续性分辨率有所改进。

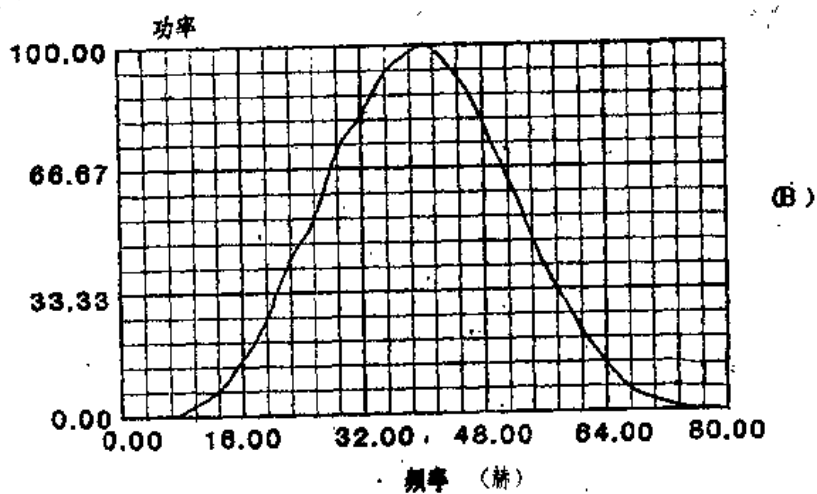
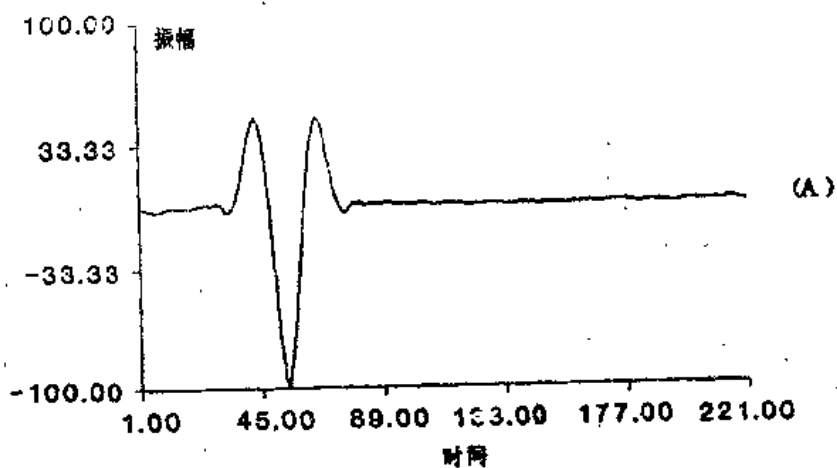


图 32 图 31 中所示原始子波经平滑反褶积滤波因子增宽处理后取得的子波波形(A)及子波波谱(B)

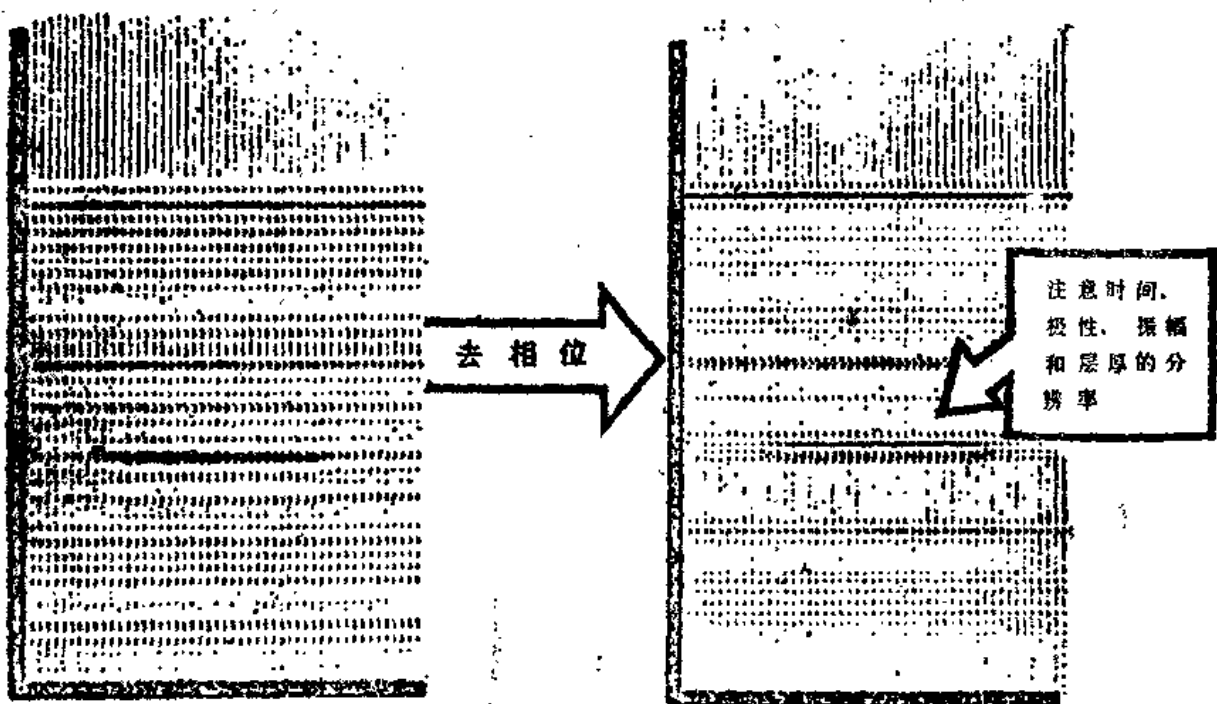


图 33 用去相位反褶积法‘窄化’长周期子波提高分辨率一例

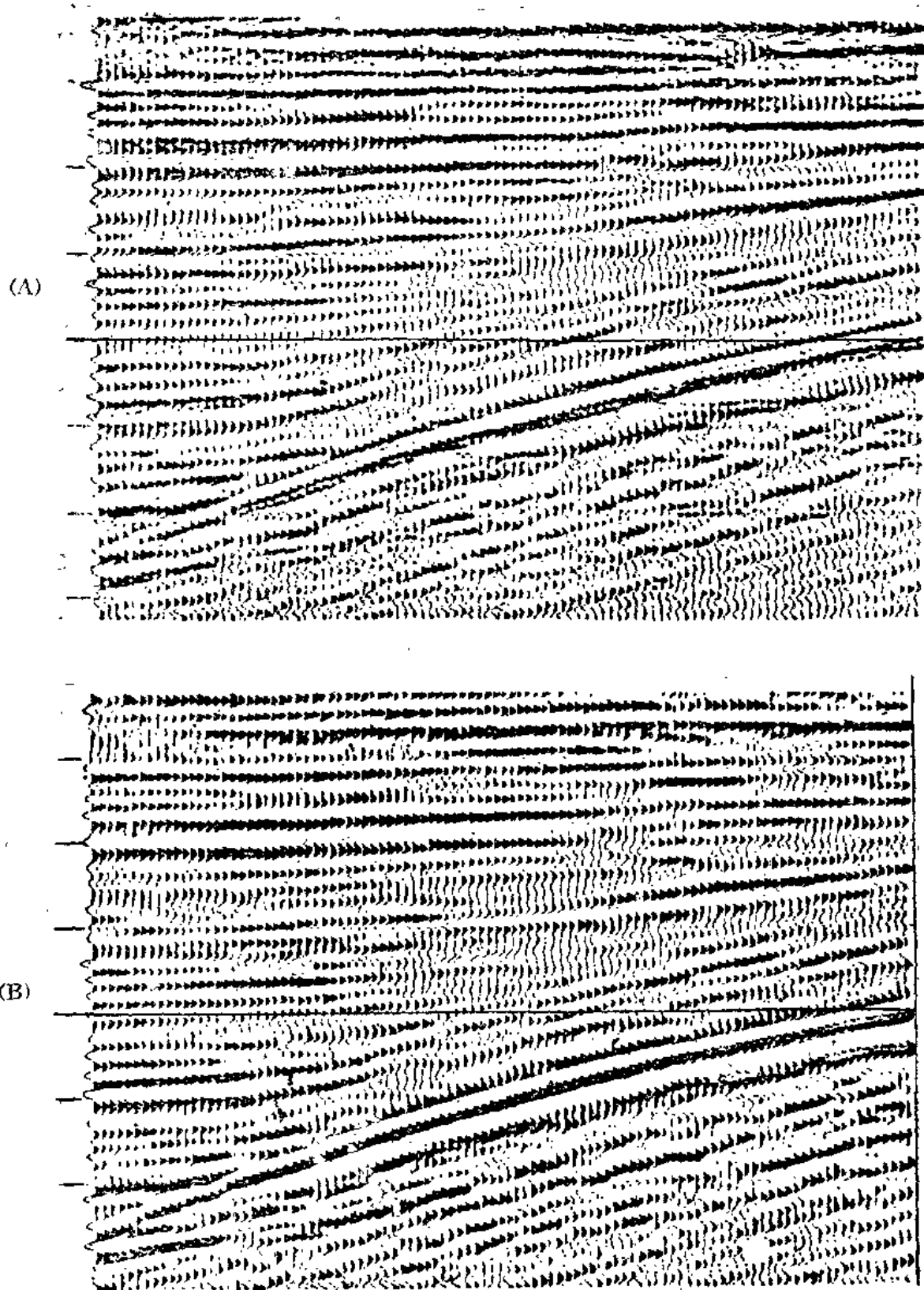


图 34 经去相位反褶积处理以后地震剖面的改善
(A) 反褶积前; (B) 反褶积后

(3) 多种、多次反褶积处理

不少实例说明,在薄层发育与条件复杂地区,对原始地震记录进行多种、多次反褶积处理是十分有效的手段,譬如:为抵消记录系统中仪器频带响应的“仪器反褶积”(见图35)、为统一不同仪器脉冲响应而作的“互等化反褶积”、专为消除多次波干扰而设计的“预测反褶积”(见图36)、迭加前为展宽子波频谱设计的脉冲反褶积,以及为了补偿迭加过程中对高频成分的压抑再次进行整形的“迭后二次反褶积”等皆属此类。

在若干地震道具有相同子波的情况下,还可以采取多道振幅谱和相位谱的平均谱作为原始地震子波之谱。图37显示单次反褶积与多次反褶积所得振幅谱与相位谱之比较,表明二次反褶积已可取得明显接近原子波谱的结果。

(4) Q 反褶积

地震子波在地下传播中,经过波散、衰减、畸变,使分辨率不断下降,直至被噪声所淹没。子波的这一波散与衰减过程可以用一个Q值(品质因数)模型给予模拟。在资料处理过程中,通过Q反褶积,也就是将传播介质模型中的“Q”值换成“-Q”,对记录波进行逆时反演,就可以将衰减变为增益,脉冲的每一频率成分可以恢复其原始幅值与相位,从而减小波形畸变与旅行时差,提高信息的分辨率。

但是在复杂的地层介质内,Q值不是一个简单的常数,它不仅随子波频率成分不同而变,也随介质岩性成分不同、传播时间而变,因而是一个频变、时变与随空间位置而变的复杂函数。由于Q值的变化在所有记录道上都有表现,它与时间延迟,相位、频率和振幅的变化都有关系,利用声波测井与地表地震相应信息之间的时差(正偏差:即地震时间大于速度测井的时间)以及VSP记录中下行(直达)波和上行(反射)波之间存在的褶积关系,也可粗略地估算出地下Q值模型,进行Q反褶积处理。

在美国东得克萨斯州,Arco油气公司利用一井的VSP数据所推算出的上行和下行波间的褶积关系,将地下粗略地划分为4个Q值不同的深段。应用此Q模型对附近的地表地震数据进行了Q反褶积处理以后,明显地提高了分辨率、改善了信-噪比,减小了旅行时误差。

其VSP法的井下检波点距是25英尺,采用的是ARIS M1000型脉冲震源,在每一深度段内,根据时窗内直达波波谱的比值,应用最小二乘方逼近法,估算出了Q值随深度段的变化来。处理流程如图38示意。在对VSP记录作Q反褶积处理之后,反射波的延续性与清晰度皆有提高(见图39)。

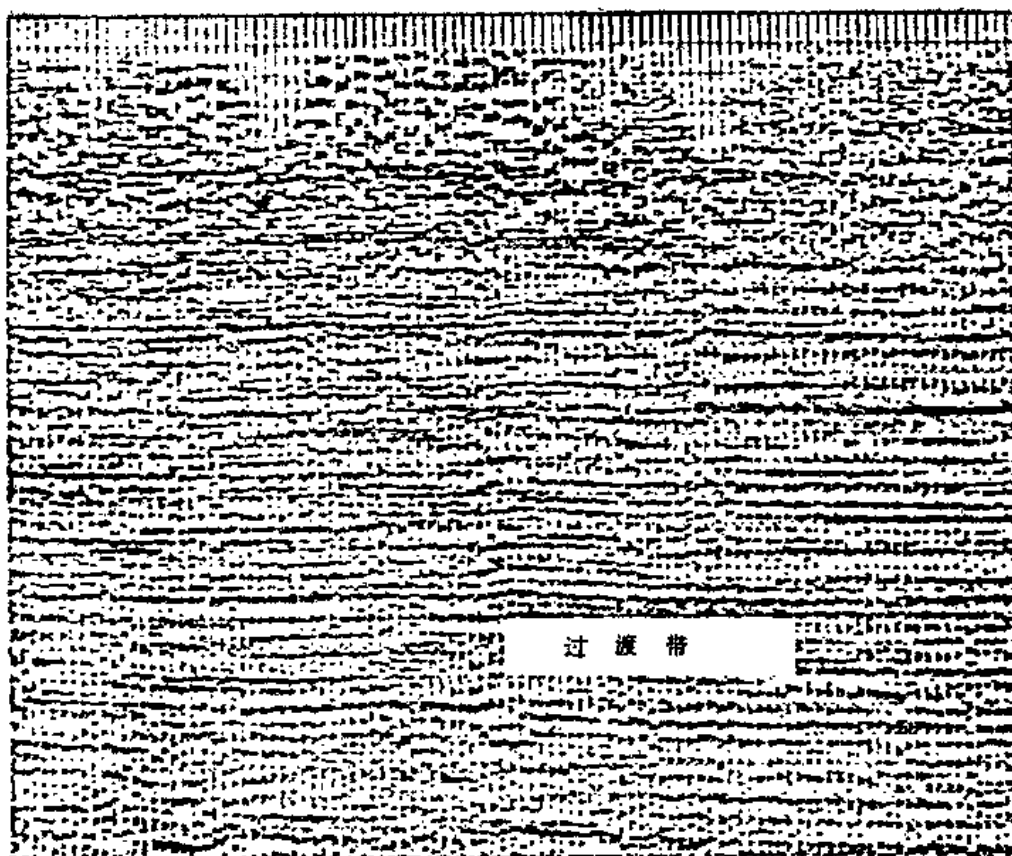
将Q反褶积技术应用到地表地震数据处理中,估算出近震源道处的Q模型具有四个深度段: $t_0=0-1$ 秒, $Q=100$; $t_0=1-2$ 秒, $Q=150$; $t_0=2-4$ 秒, $Q=200$; $t_0>4$ 秒, $Q=600$ 。以此为依据对整条测线上的共深度点资料进行反Q滤波以后,又对它进行Q尖脉冲反褶积处理,采用的自动校正时窗是1—4秒,白噪声电平1%。结果见图40。

从图中可见,甚至在旅行时超过3秒之处,子波还包含有高频成分,与测井推导出的合成图相符。

在实际应用中,处理子波的旅行时间与带宽的乘积不能超过有效Q值的二倍,所以难以对来自过深(旅行时过大)界面、频率过低(主频低于处理频带的低截频)的子波进行补偿。但是在应用维纳滤波器适当控制子波的旁瓣以后,还可以适当扩大其补偿范围^{[69]、[70]}。

(5) 最大熵反褶积处理法的优越性已如前述,在苏联西乌兹别克斯坦 Джебе地区曾利用最大熵反褶积程序(ФИЛМЕМ)处理了用常规反褶积法预处理无法分辨的测线资料,取得了较好结果。资料来自扫频范围不宽(20—48赫)的可控震源。目的层的深度是

(A)



(B)

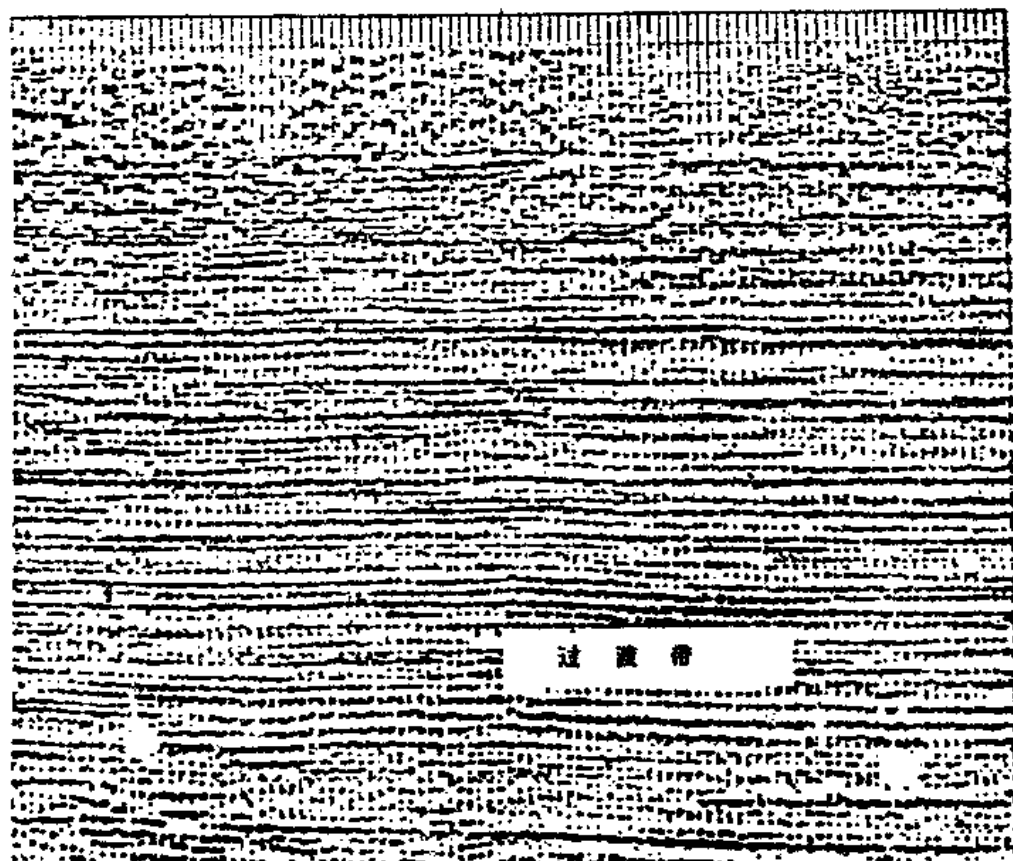


图 35 消除仪器频带响应的仪器反褶积效果
(A) 反褶积前; (B) 反褶积后

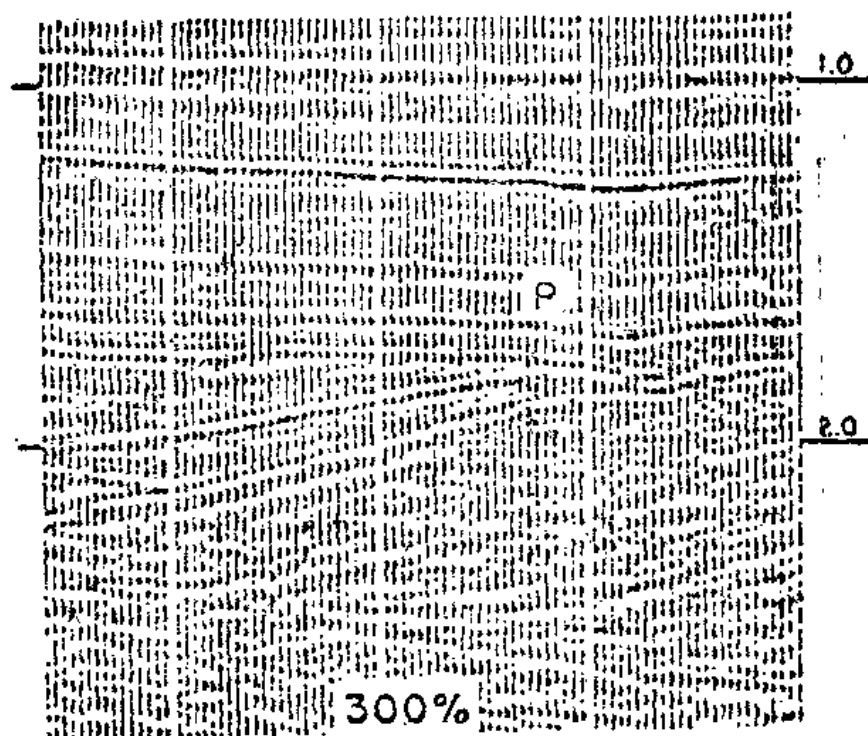
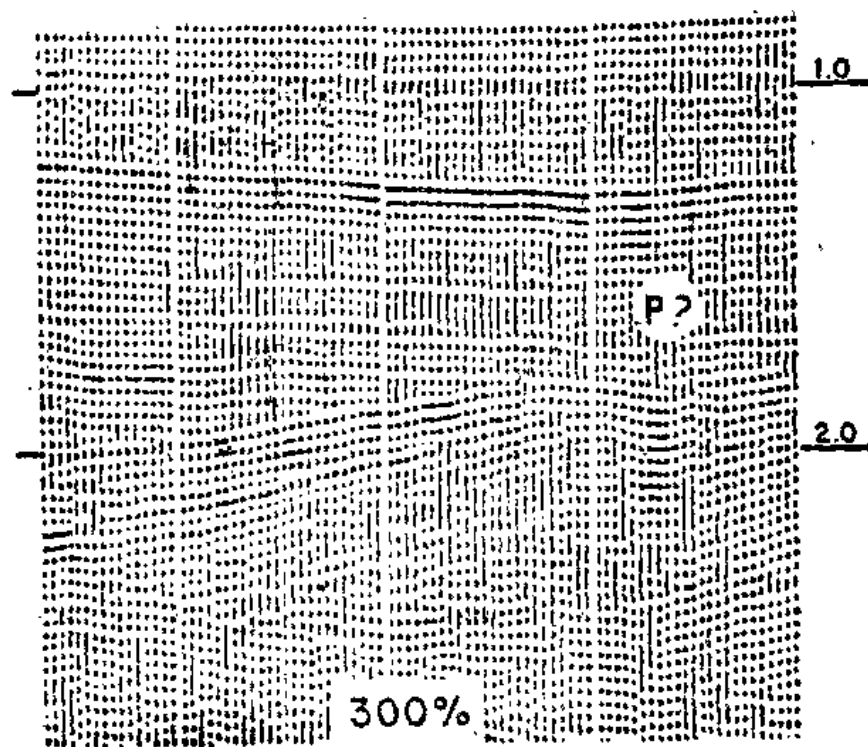


图 36 用预测反褶积压制水层交混回响一例
(A) 反褶积前; (B) 反褶积后

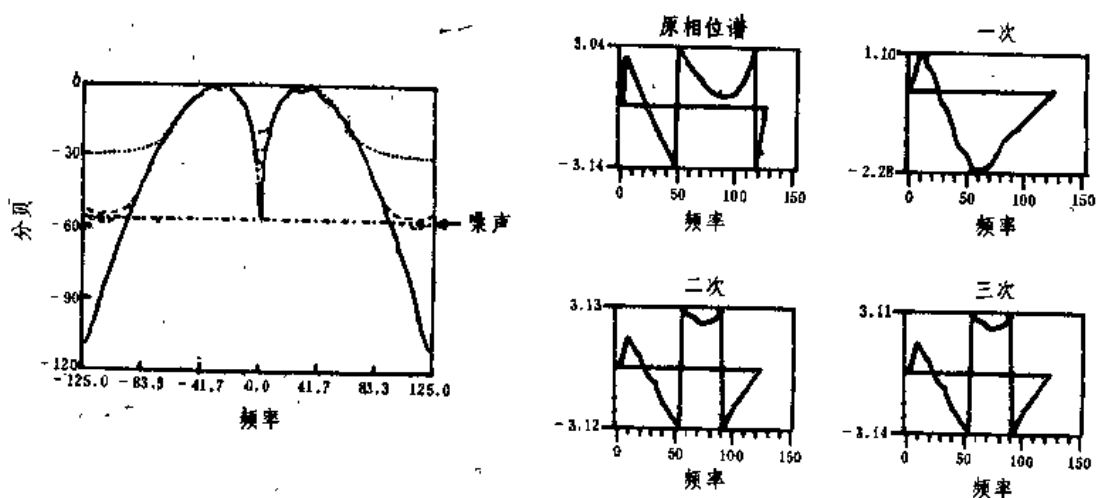


图 37 单次反褶积与多次反褶积所得振幅谱与相位谱的对比

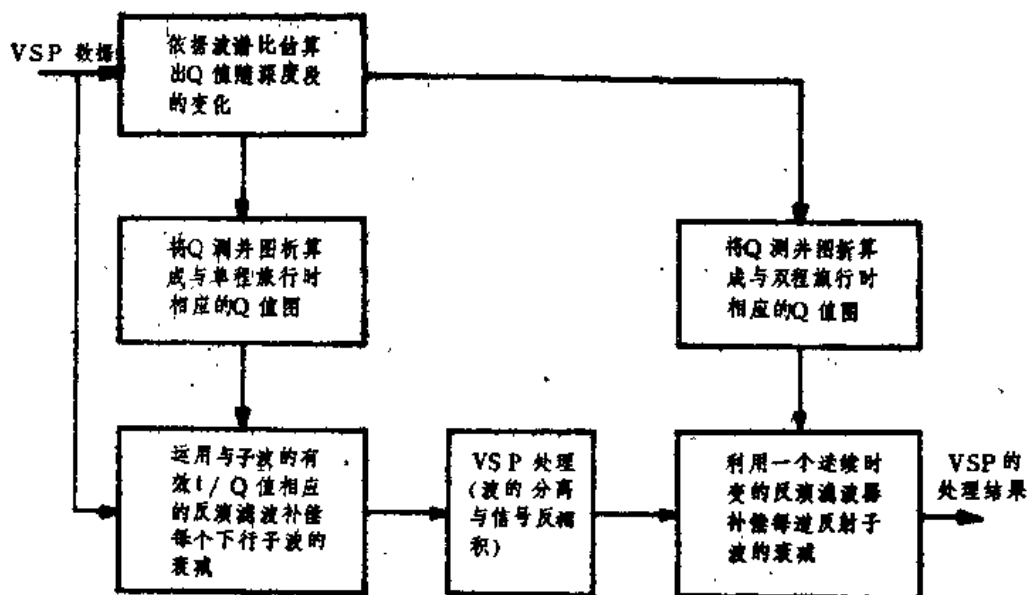


图 38 VSP 数据作衰减补偿处理的流程图

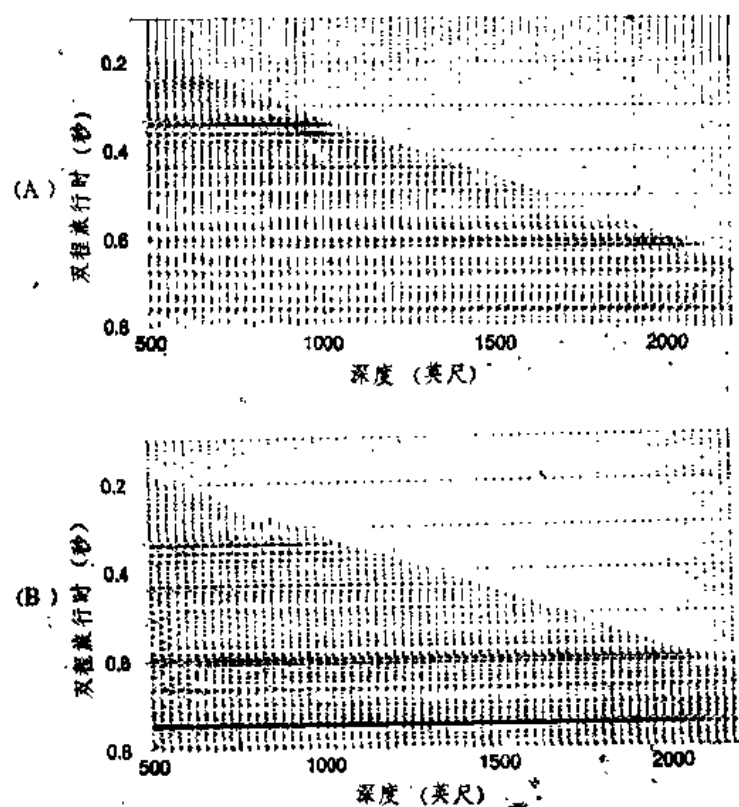
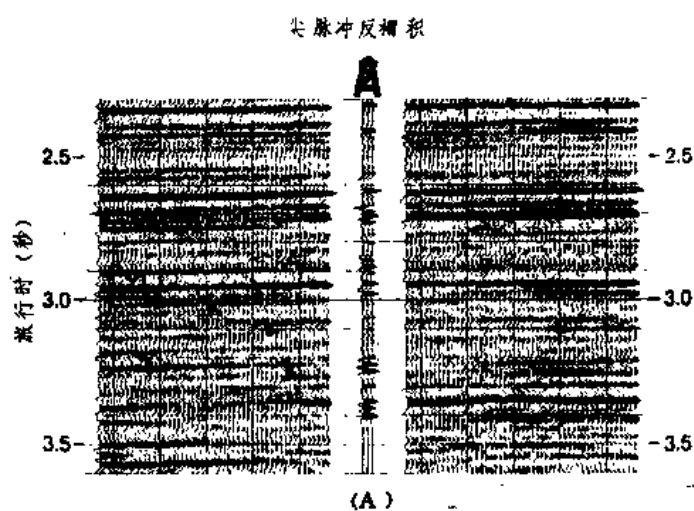


图 39

(A) 进行Q反褶积处理前的垂直地震剖面图

(B) 经过Q反褶积处理以后的垂直地震剖面图



补偿后衰减的尖脉冲反褶积

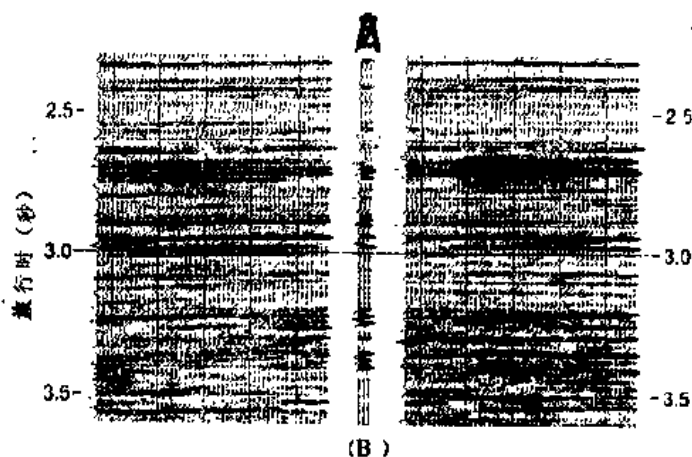


图 40 应用 Q 反褶积处理提高分辨率一例
(A) 尖脉冲反褶积处理结果 (B) Q 反褶积 + 尖脉冲反褶积处理的结果

1.7、1.78、1.86 和 2.15 秒。原始资料预先进行了相关处理、带通滤波、动静校正与共深度点迭加。从图 42 可见，只有采用最大熵反褶积处理，在信号频率提高、子波脉冲变窄以后，剖面图上的分辨率才得以提高。

用此法处理每一地震道耗时不超过 12 秒。处理成功与否的关键在于正确“调整”子波波形。

最大熵反褶积法有效加宽信号频带、缩短子波脉冲的试验结果见图 41。

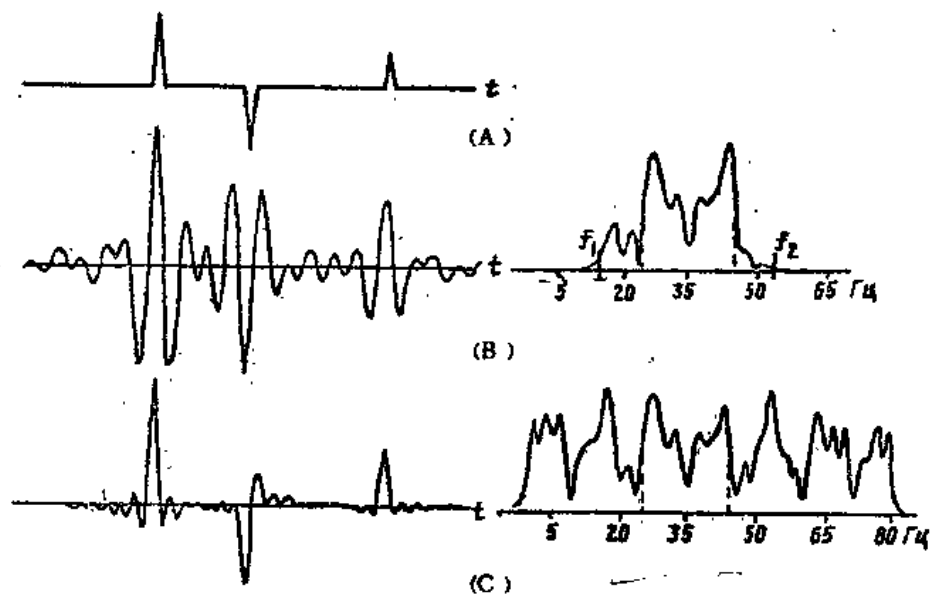


图 41 最大熵反褶积改善子波脉冲波形的试验结果

(A) 介质反射脉冲； (B) 相关处理所得子波； (C) ФИЛМЕМ程序（最大熵反褶积）处理结果。
 f_1 、 f_2 表示扫频信号的频带宽度；虚线表示预期谱所依据的原始频谱带

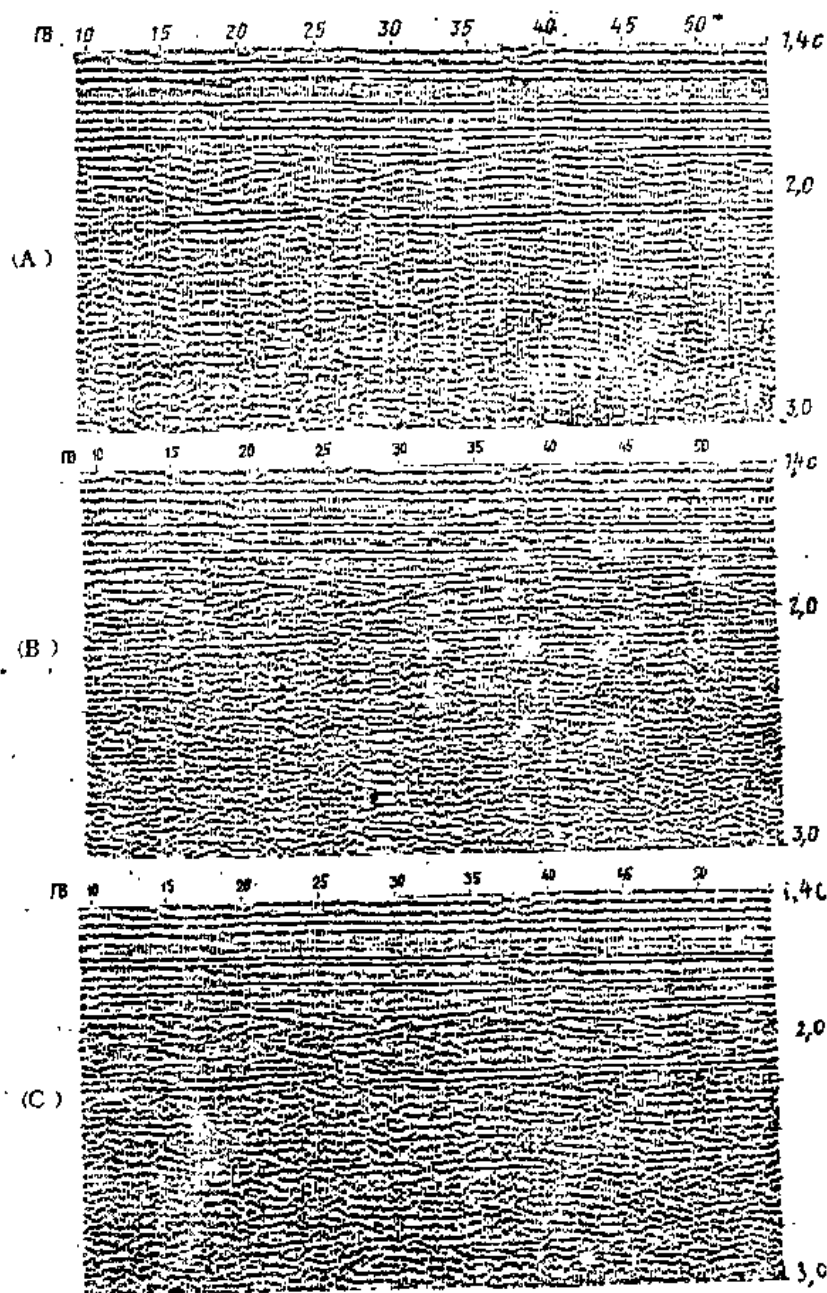


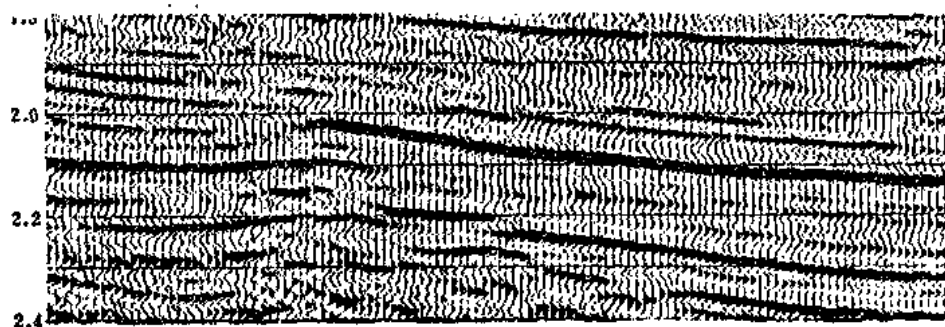
图 42 西乌兹别克斯坦时间剖面一例
(A) 原始剖面 (B) 反褶积预处理后剖面 (C) 最大熵反褶积 (ФИЛМЕМ) 处理结果

在国内，也曾利用最大熵反褶积处理使子波频谱朝高频方向扩展到 80—90 赫，取得了泥岩互层分辨率明显升高的效果^[6]。接着又用波阻抗测井资料、配合 80 赫的子波合成理论记录并根据钻井资料设计的地质模型作了验证，证明其结果正确。

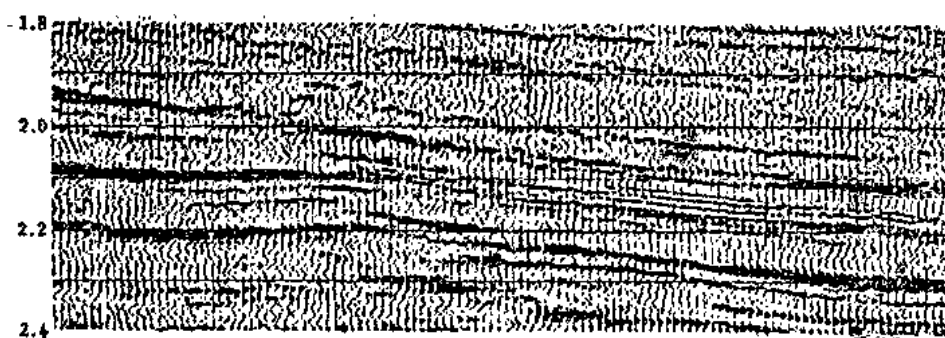
因最大熵反褶积法与脉冲反褶积同样要求子波具最小相位。为此，应当利用子波设计一个最小相位转换滤波器，进行“最小相位转换-伯格反褶积”处理。实践表明，这样处理分辨率确实最佳（见图 43、44）

4. 偏移技术简评^[15]

偏移处理的目的在于实现反射层的空间自动归位。使断层发育地区内绕射波形成的干涉



(A) 经宽频滤波处理的实际剖面



(B) 最小相位转换-伯格反褶积结果

图 43 利用“最小相位转换-伯格反褶积”处理泥-砂互层提高分辨率的结果

带自动分解；绕射点收敛归位，真正来自同一反射点的信号自动迭加、增强。它在分辨岩性异体、鉴别小断层、排除复杂构造的干扰等方面起到了重要作用，成为提高地震法横向分辨率的重要环节。

(1) 类别与特征

偏移可以在迭加前或迭加后处理，后者（迭加偏移）应用较广，而前者（偏移迭加或称迭前偏移）既贵又繁，只有在波速结构太复杂时才使用。

按算法分，常用的偏移法有 4 种，即：

①绕射扫描偏移迭加法—此法依靠在地下建立网格，沿网格进行扫描，利用绕射波时距曲线方程计算绕射波旅行时，在各记录道的相应时刻读出幅值，再将同一反射点所有的幅值迭加起来取得总幅值（若非反射点，总幅值应近零值），就可实现偏移迭加。此法不受界面倾角限制但所需计算量极大，因而使用不很多。

②克希荷夫积分法—此法建立在波动方程的克希荷夫积分解基础之上。既不受倾角限制，对信-噪比低的资料也有效果，还能保持反射波的特征；但是归位后剖面中的噪声干扰背景稍强，而且需要大量数据来确定偏移参数。

③（二维）有限差分法—这是应用最广的偏移法。此法对波动方程进行了坐标变换并略去波场对深度的二阶导数，再用有限差分法求出简化波动方程即得。方法较简、噪声较小，在速度变化时仍能处理，绕射波收敛效果也较好，但只限于倾角不大（ $\varphi \leq 15^\circ$ ）的情况下可

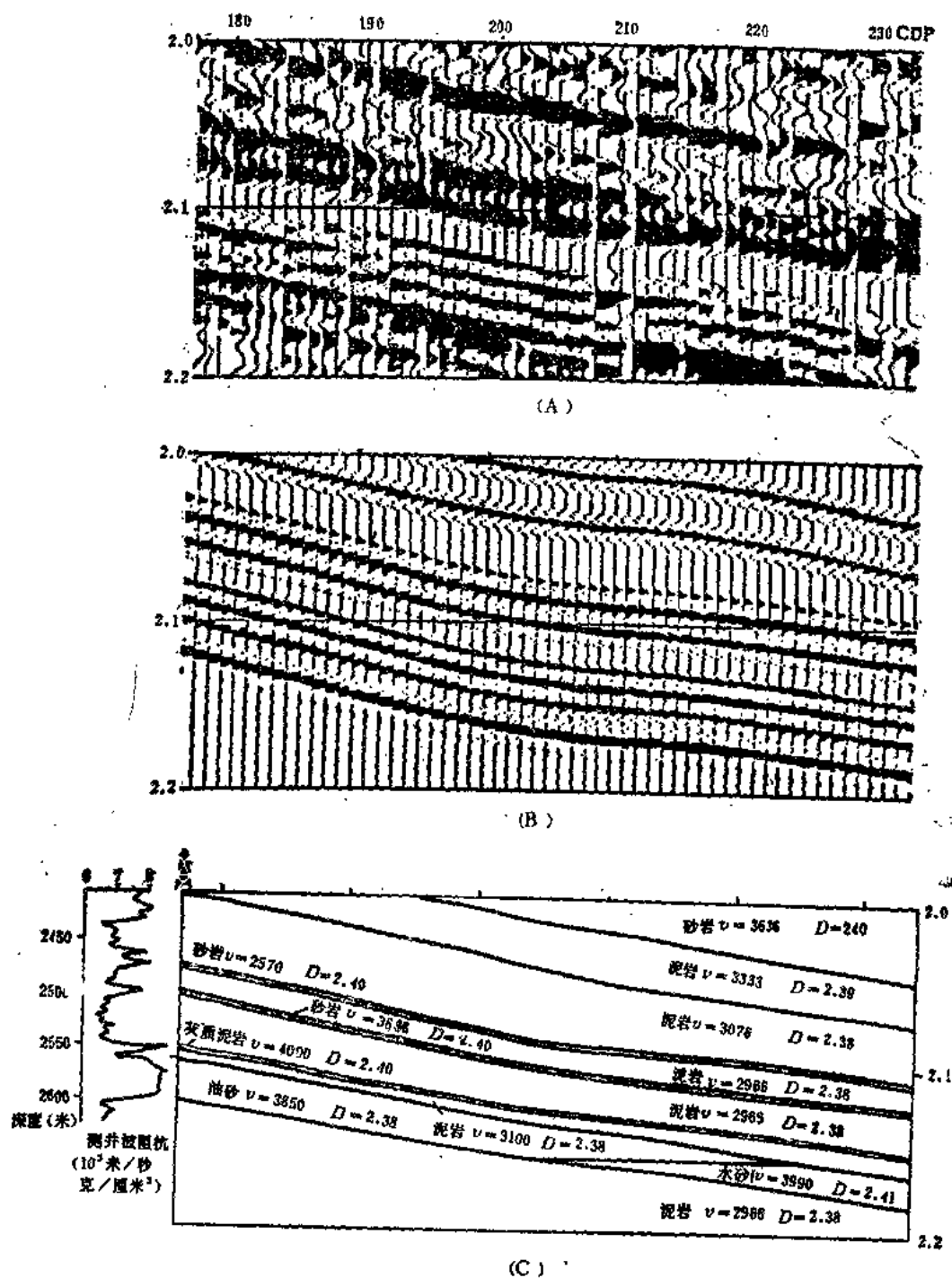


图 44 反褶积结果的真实性检验
 (A) 实际记录的最小相位转换—伯格反褶积结果；(B) 80Hz子波的理论合成记录；
 (C) 根据钻井资料设计的地质模型

以使用，存在波散问题，对不均匀介质的地震信息十分敏感。

④付氏变换法—此法利用二维正、逆付氏变换，在波数域 (k) 或频率-波数域 ($F-k$) 中对波动方程求解。后者宜于在倾角稍大 ($\varphi \approx 45^\circ$) 的情况下使用，也可以在迭前偏移和

三维偏移中使用。但横向波速变化会引起反射界面畸变,不正确的波速会引起不正确的偏移。

如果按照对复杂速度构造的适应程度不同来划分,则可分为“时间偏移”和“深度偏移”两大类。在覆盖层波速水平向变化较小,即偏移前、后波速变化 $<2-3\%$ 时,宜用‘时间偏移法’(包括克希荷夫积分法与 $F-k$ 域付氏变换偏移法)。在波速结构复杂的地区,覆盖层中有折射现象会造成水平与垂直两向传播的时间误差时,只有采用“深度偏移法”。可用有限差分法,在深度空间一步步向下延拓,并加上静态时间漂移校正。

迭前偏移法所做假定最少所取近似的次数也最少,但对于速度结构的灵敏度最高,贵且费时,因而使用不多。常用的几种处理方法各有优劣,详见文献[15]。但是也有人认为此法高度有效,主张大力研究^[48]。

(2) 偏移步骤

多年实践经验表明,处理者与解释人员必须在整个处理过程中密切配合。合理的偏移处理更是一个反复修改、循环迭代的过程,可归纳为以下三步骤:

①初步确定速度结构的复杂程度,做法是:

(a) 从时差速度分析和迭加剖面的初步解释上取得初估的速度函数($V(t)$),如有测井资料则更佳。

(b) 因陡倾角的反射易丢失,不能过早限制倾角,宜先用较为经济的付氏变换($F-k$)时间偏移法取得初步深度模型,由解释人员从中找出原 $V(t)$ 函数的差错,并用内插、外推法加以纠正。

(c) 用正演模型与原始迭加剖面对比,校正波速结构,使反射层迭加更好。

如此迭代进行,直至深度模型与速度结构既与迭加剖面相符,又在地质结构上合理。

对于简单结构,到此已达目的。如果构造复杂,还需作下一步。

②判断问题的复杂程度。

为此要在目的层附近选出一些点作为绕射源,根据所用速度结构计算形成的绕射图形,就可看出实际结果与理想双曲线间的差异。再根据波至时间呈现的“蝴蝶结形”,选择适当的偏移方法。在构造很复杂的地区,则要选用更精确的迭前偏移处理法,而且要求波速精度与该法的要求相符。还要摘除“三维”侧波的影响、反复比较和修改。

③正演模型最后考核(可用数学运算法)。

总之,处理人员需要掌握各种偏移处理方法,随着所掌握的速度结构复杂程度不同,适当选择下一步偏移方法,并反复迭代作处理和修改。还要求具备图解模型和绘图程序(最好是人机联作),以便根据每次迭代结果来修改速度结构或其它参数。

用偏移技术提高地震分辨率的实例见图 45、图 46。

三、新方法的应用

除开一系列常规的高分辨率地震勘探技术之外,为了进一步提高地震勘探法的纵横的分辨能力,更好地解决勘探中尚存的各类难题,近年来国外正在不断扩大应用的方法范围,研究各种新技术在提高分辨率方面的特殊作用,力求为地震法分辨率的提高开创更新的领域和途径。下面仅将已经证实具有明显优越分辨能力的几种新方法简单介绍一下。

1. VSP 法在提高分辨率中的作用

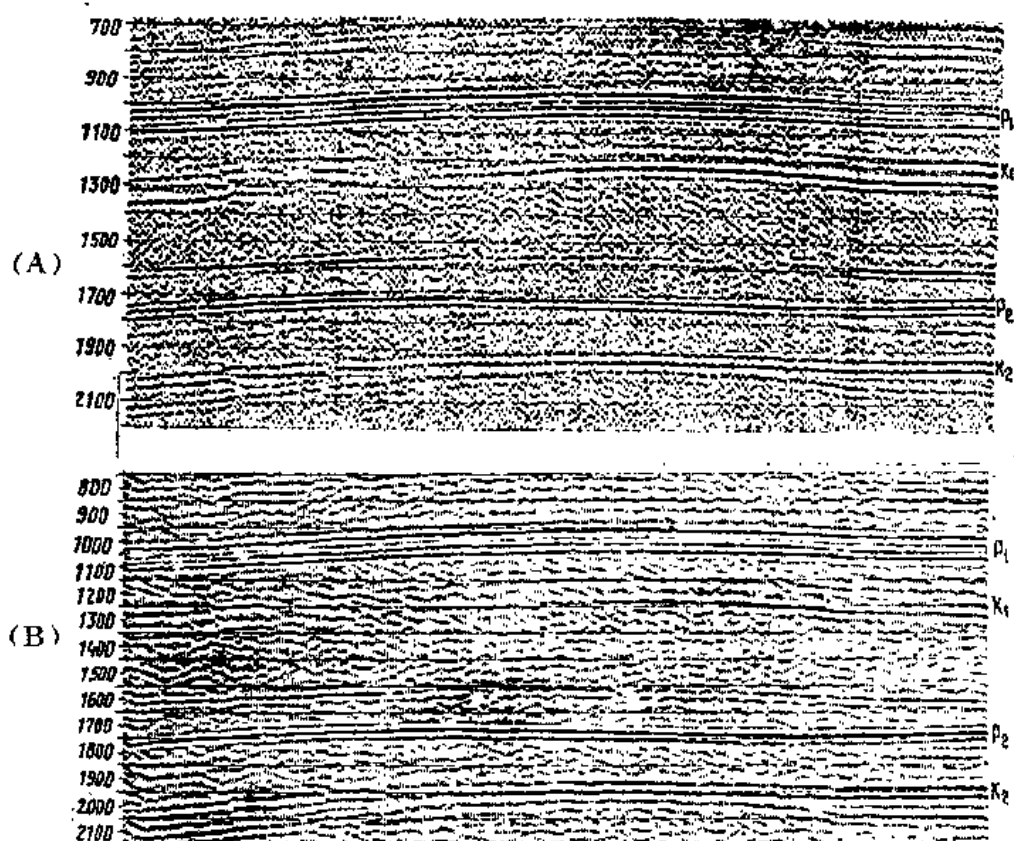


图 45 莫斯科向斜 (СИНКЛИЗА) ДАННОВСКАЯ
构造上应用偏移法压制多次波一例
(A) 共深度点剖面 (B) 偏移处理后剖面 (多次波被压抑1.5倍)

VSP法当前在国内外皆很受重视,尤其是在探井、采井林立的油区,更具发展前途。

国外经验已证明,VSP法对于检测小断块、小倾角构造与小砂体的位置、预测井底以下的岩层来说均具有较高的分辨能力。下面仅列举若干方法实例加以说明。

(1) VSP“多偏移距法”(Walkaway),在苏联称为“反向反射观测法(RRO)”。做法有二:一是保持井口源距不变,上、下移动井内检点;另一是保持检点不动,横向改变井口源距,都能使目的层的反射点以等距离(Δx)从井点“步开”,有利于步步跟踪井内已查明的界面逐步向外引伸。为了增强有效信息,压低多次波干扰,一般常取3—4个固定检点不动,取得的数据经动校正后进行迭加。随着检点深度不同,震源“步长”也将不同。

此法有利于横向跟踪目的层(长达数公里)与断层定位(精度 <30 米),对于预测井底以下反射层也很有利。

(2) ‘VSPCDP’法 方法很简单,只需将VSP与地表CDP地震剖面相结合,CDP检点距可较大($\approx 50-60$ 米),VSP检点距较小(≈ 8 米),就可取得横向具有一定宽度的截面图来。其优越性在于:

①地下波速剖面无须事先预知,层速也可通过VSP初显时间算出(或靠迭代法)。②震源与检点无需精确置位,只需知其坐标即可作几何校正。③观测量相对少,而且震源相同

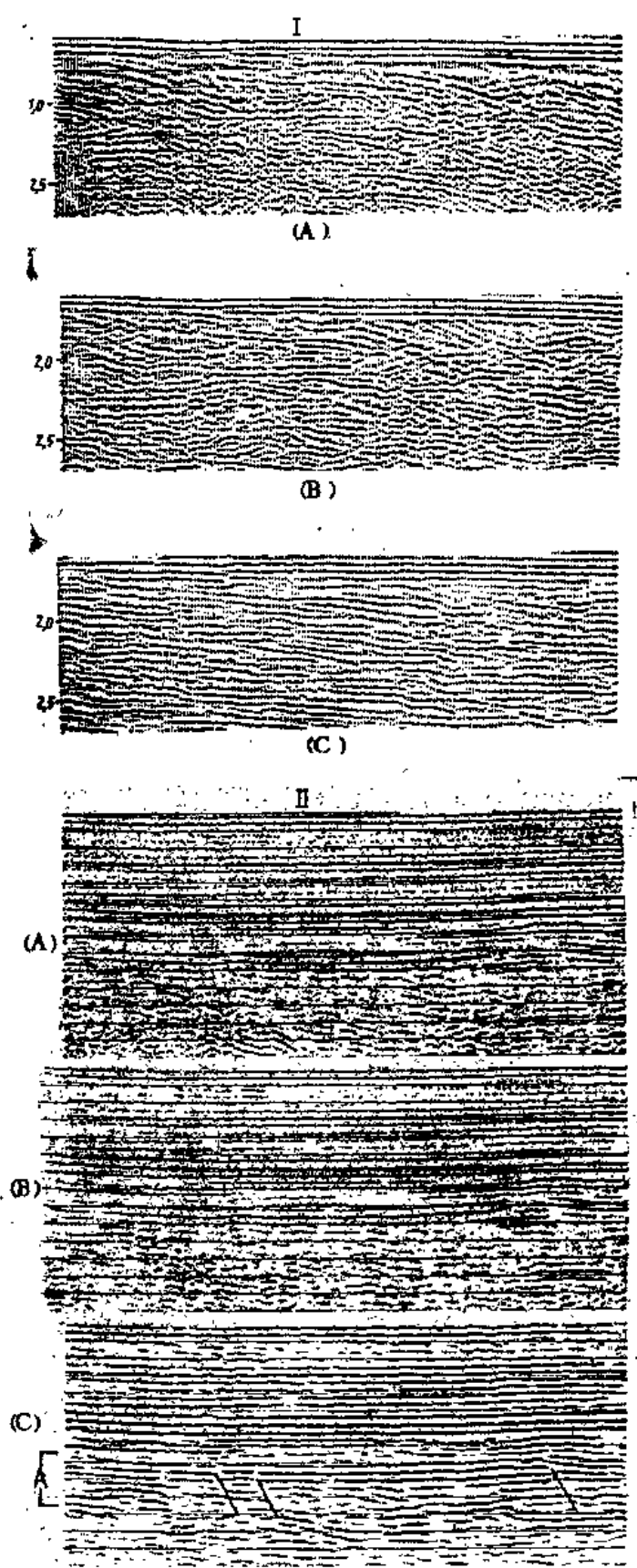


图 46 苏联西西伯利亚注地，利用偏移处理取得深部（1.8~2.4秒）断裂破坏带记录二例

(A) 共深度点剖面 (B) 45°偏移处理结果 (C) 偏移法加剖面

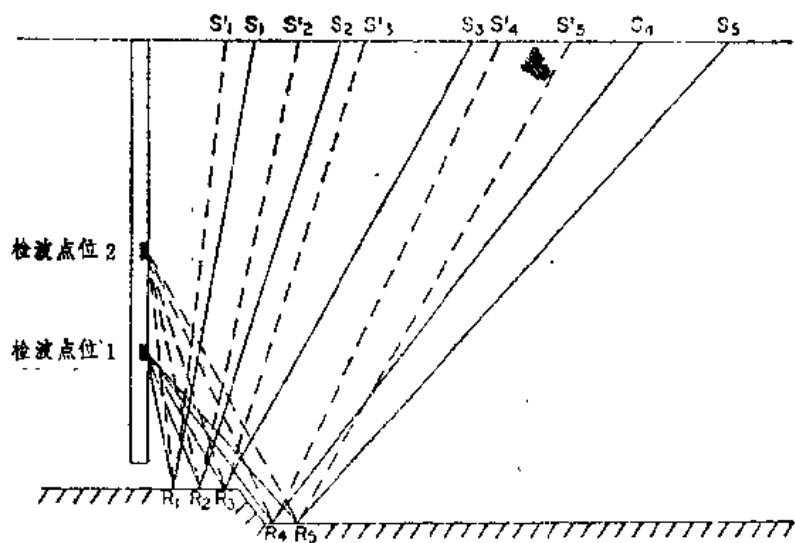


图 47 VSP多偏移距法高分辨率, 多次覆盖
(以 2 次为例, (实际常>3-4次) 观测示意)

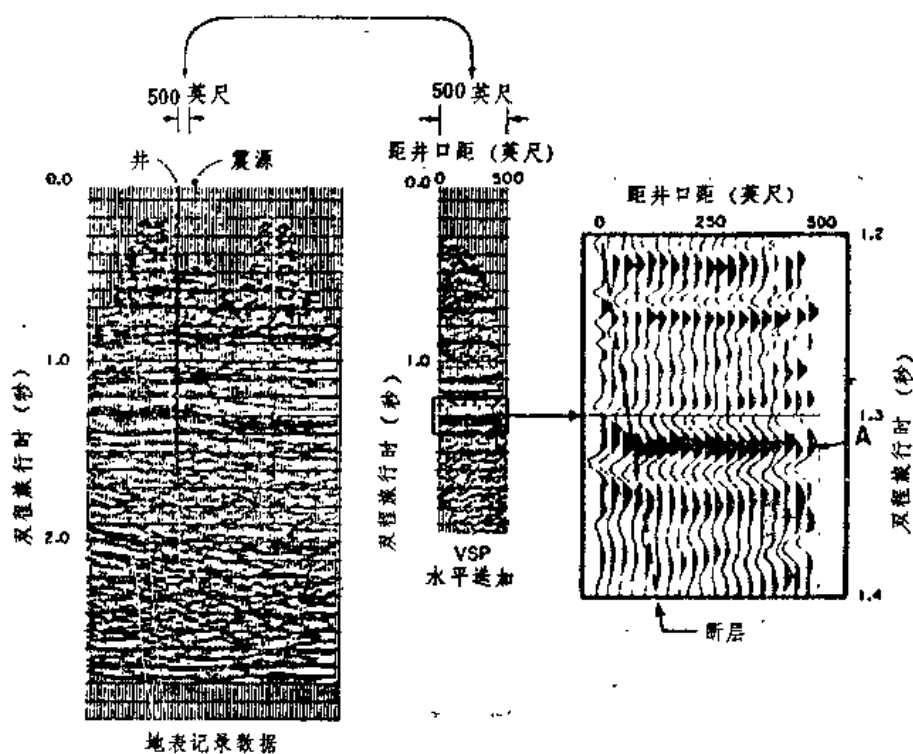


图 48 VSP多偏移距法与地表观测地震法在
确定断层位置分辨能力的对比实例 (二者之间时差约40毫秒)

有利对比。④利用 VSP 的信息还可重新处理常规地震资料 (如进行反褶积处理等), 使其结果明显改进。

此法对于寻找断层十分有效。(唯国外的数学处理流程尚未公布)

(3) P、S 波 VSP 综合分析法

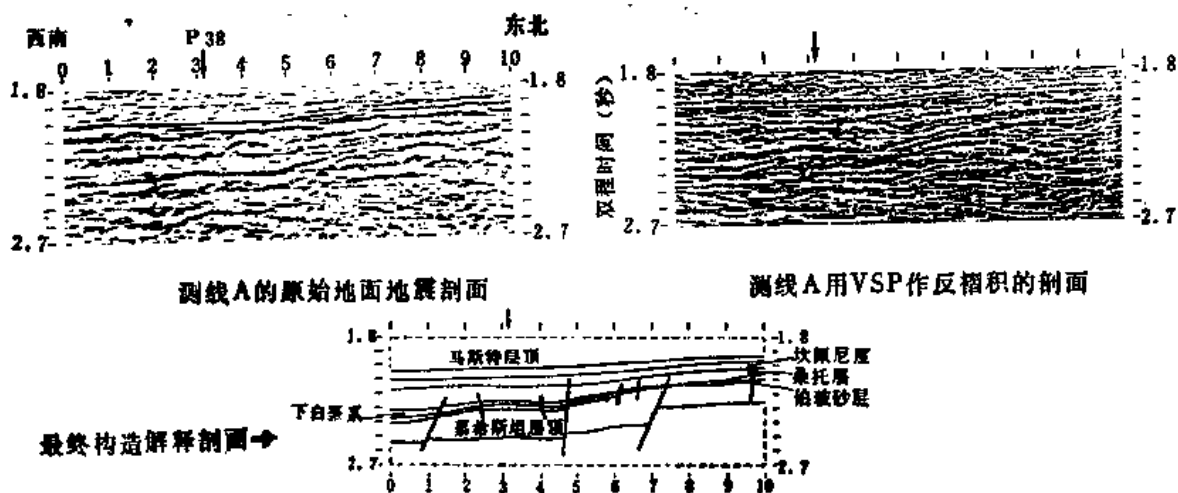


图 49 伯波油田小落差断层 (落差~15米) 用VSP法勘出一例

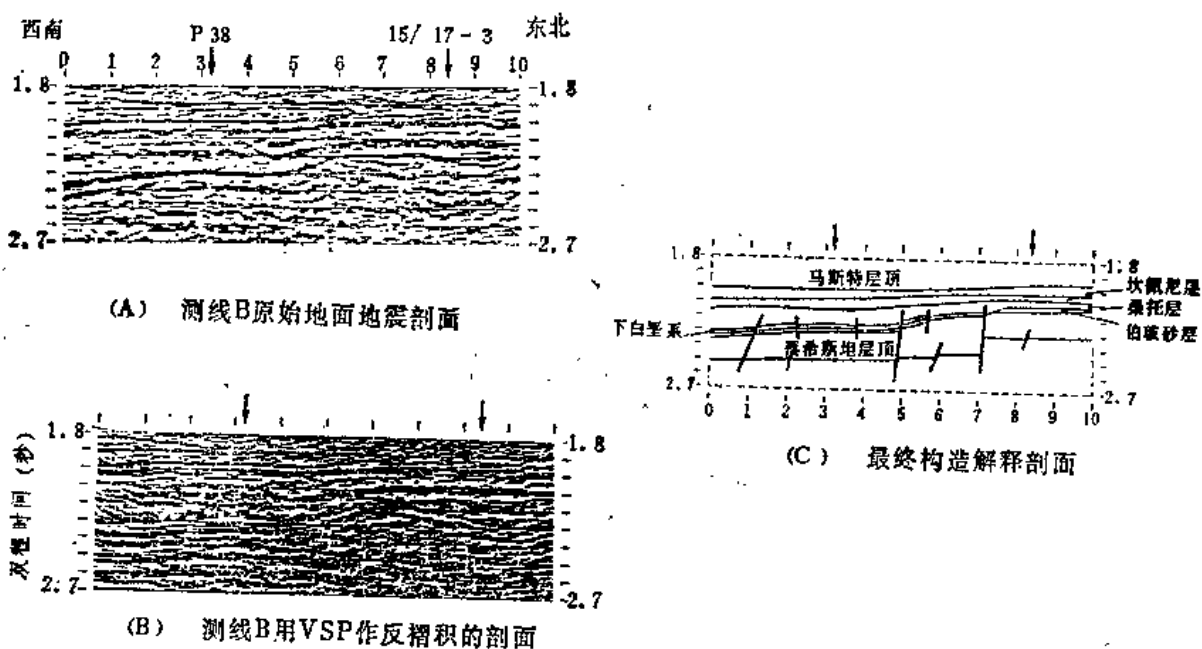


图 50 利用VSP 资料对旧地表地震剖面进行反褶积处理后分辨率的改进 (伯波油田一例)

P波是寻找构造式油气藏的好工具, S波可为岩性变化、断裂及孔中液性等提供更为灵敏的数据和更多参数。在勘探隐蔽油气藏日趋迫切的今日, 综合分析P、S波数据的必要性日增。尽管横波法由于震源不理想、水平检波器安置不便等原因, 至今在国内应用不广, 但是随着多种新型横波震源的诞生 (如转换波型震源及能保持波形长期严格不变的美军用4.2'研钵型震源^{[46][44]}等), 人们对于P、S波资料的综合利用正在日益重视中。然而地表观测所取得的P波与S波地震剖面上所显示的异常往往差别甚大, 难以相互对比。若非通过S波声波测井将S波到时值转换成为深度, 或是通过S波合成地震图, P波与S波记录资料的

有效综合利用是难以做到的。这里正是三分向 P、S 波 VSP 法发挥其优越性的一个重要方面。

用 P、S 波 VSP 记录与高分辨率地表 P、S 剖面建立联系的一实例见图 51。地表观测时，检点距 10 米，检波器埋深数英寸以降低干扰，覆盖次数 48。通过对比就可推算出整个地表剖面区内的纵横波速比值、地层泊松比值等沿深度变化的曲线图来。

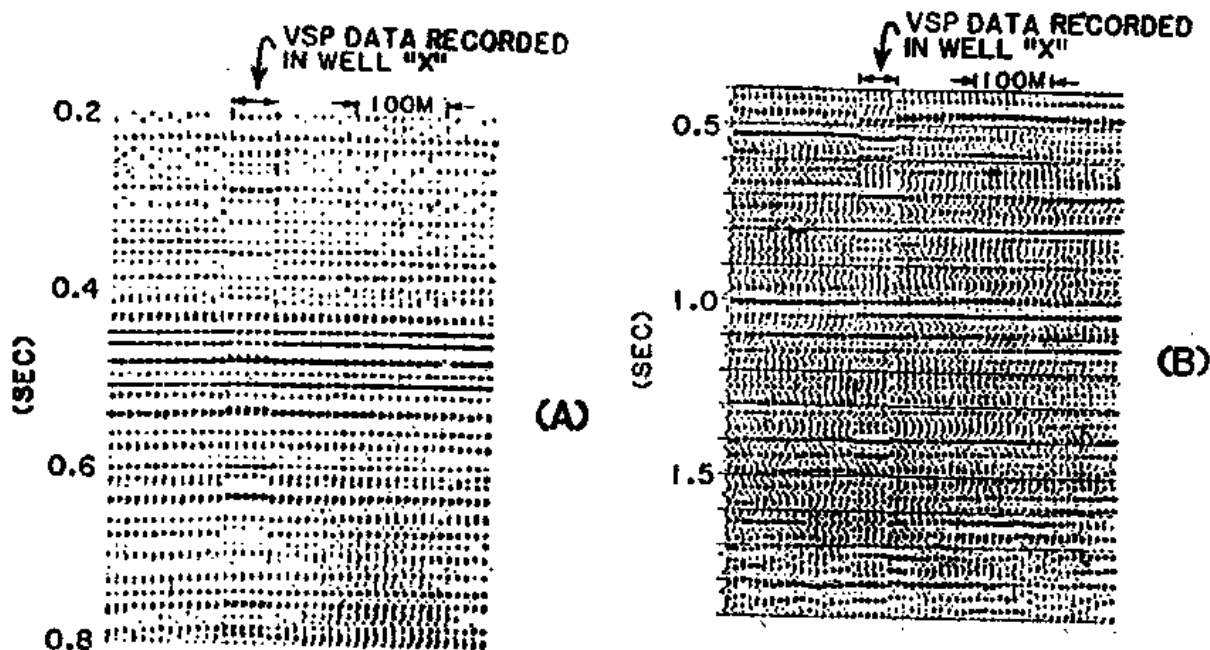


图 51 (A) VSP上行 P 波记录与地表 P 波反射记录的对比

(B) VSP上行 S 波记录与地表 S 波反射记录的对比 (A、B图中时间比例不同)

巴黎盆地一井,在 500—1420 米深度段内进行了 P、S 震源三分向的 VSP 观测记录⁽⁴⁴⁾ (垂向检点距 20 米)。综合分析 P、S 波数据的分析结果见图 52。分析表明:①硬岩(competent rock)的垂向波速比值 $Y_t (=T_r/T_s = (V_s/V_p)_{\text{垂向}})$ 一般 >0.5 ,而页岩、粘土的 Y_t 值 <0.5 。②由于 V_s 随着岩性变化的灵敏度比 V_p 高,因此水平向波速比值 $Y_v ((=V_s/V_p)_*)$

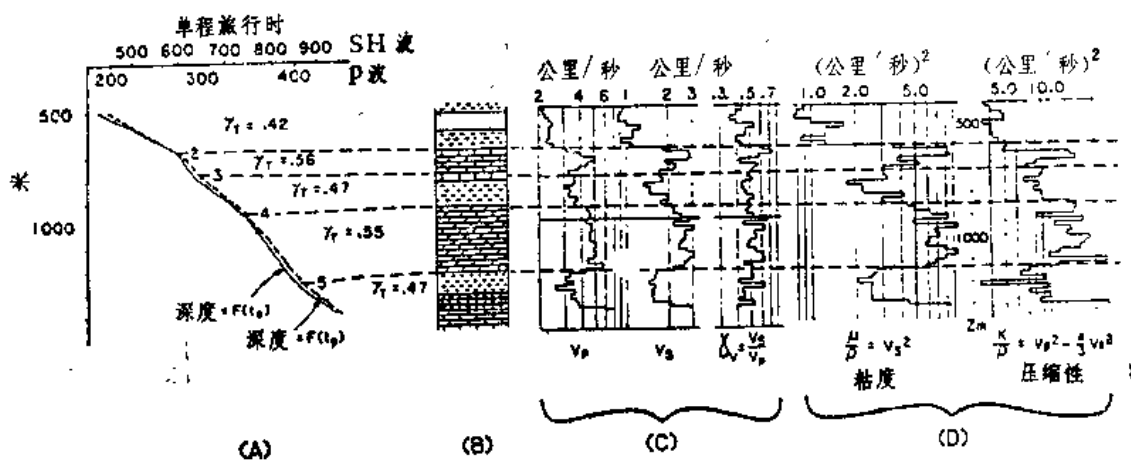


图 52 在一口 VSP 试验井内 (Omnes, 1980), 根据纵、横波数据计算岩石物性参量一例, Y_t 与 Y_v 变化表示波速不均一性, μ 显示粘合程度, k 随压缩性而变。

④) 将在岩性变化、断裂及其它速度因素影响下灵敏地改变, ③分析图中还给出了从 V_s 、 V_p 的比值推算出的“粘合度” (μ/ρ Cementation) 与“压缩性” (k/ρ Compaction) 随深度变化的曲线, 它们分别表示岩石颗粒间的胶固程度与介质的压缩程度。这些参量对于鉴别薄层、寻找小断块、小砂体来说皆很有用。

1982年 Andet 与 Garotta 的野外实验表明多孔鲕石石灰岩、无油碳酸岩中的 Y_t 为 0.6, 而产油鲕石区的 $Y_t = 0.48$ 。

如果再结合地表观测所得的斜行 P、S 波旅行时换算得的水平向 V_s/V_p 值 (Y_v) 与 VSP 观测到的垂向 V_s/V_p 值 (Y_t) 可以求出二者之间的比值 Y 作为一个新的参量: $Y = Y_t/Y_v = (V_s/V_p)_{\text{水平向}} / (V_p/V_s)_{\text{垂向}}$, 经验表明, 此参量对于碳酸岩中 断裂、粘土中 页岩成分的增量、岩内孔隙中流体的变化及过压区的勘测来说皆是一个很有价值的预测参量。

(4) 斜井 VSP 法

做法是: 在斜井中进行 VSP 观测, 将震源安排在检点之上, 井下检波点的斜向距离不定, 而以保持其水平分向距 Δx 恒定为准 (ΔZ 取变量)。

斜井 VSP 既具有垂井 VSP 法的优越性, 可用各种速度滤波方法 (如 F-K 滤波、中值滤波、多个窄频带构成的宽频带滤波、波场相减处理法等) 来分离上行下行波并利用下行波反褶积算子来排除上行多次波; 它也具有横向扩展地下响应的功能—这相当于在大大靠近目的层的深处空间内进行纵横向高分辨率地震剖面观测, 因此对于勘测小断层的位置具有特殊功能 (在设计恰当时, 甚至无需作偏移处理)。

下面是斜井 VSP 工作示意图 (图 53), 水平界面上行反射 R_1 的道间时差值与直达波 D_1 相等, 而倾斜界面反射 R_2 、 R_3 的道间时差就与直达波 (D_1) 不等。在经过排除下行波与初至波延时处理以后, 可转化为二个双程旅行时的函数图: $Z(t)$ 和 $X(t)$, 更为直观地展示出地下反射断而沿 X 轴与 Z 轴分布的真实状态。

如果还有必要细查斜井井口另一端地下复杂的地质情况, 可在距斜井口一定距离之处, 再钻一口垂直井, 取得二井的 VSP 观测与声波测井资料 (见图 54)。再通过速度滤波与绕射波波峰点的利用, 1981 年 Kennet 与 Ireson 以时差 (< 50 毫秒), 深差 (< 50 英尺) 的精度查明了在时深 2.4 秒处 (深度 > 8000 英尺) 的断层与断点所在 (1、2、3) 以及斜井穿越的断层 A、B、C (见图 54)。

Kennet 等 (1981) 在北海地区还利用了斜井 VSP 法特有的纵、横向高分辨能力, 成功地细勘了斜井所覆盖的横距之内 (460 米)、侏罗系不整合界面之下 (时深 > 2.4 秒) 难度较大的小断层结构 (见图 55), 显示出了此法在勘查小断层中所具有的优越性 (与三维地震相较)。

(5) 地震透视法 (tomograph)

将震源与检波器分别置于两口不同的深井之内, 即可取得地下仿医用的“X光透视”图象。其优点在于: 地震波行程最短, 又不行经风化层, 高频损耗最小, 子波的振幅大, 频带宽, 因此, 分辨率也高。1980 年 Parrot 以气枪为震源进行了初步试验, 表明采用 1.97 公升的气枪, 工作在 20680 千巴压力下对井孔及套管无损。两井相距 150.6 米, 震源深 228.5 米, 检点深 360—950 米, 取得了频率高达 200—400 赫的信息, 获得了一张包含盐丘、薄页岩、硬石膏、白云石层地区的“透视”记录 (图 56)。尽管原始记录上存在多种套管波的强烈干扰。但从提高分辨率的角度来看, 若在震源井内加稠重液促使套管波迅速衰减, 并继续进行一系列改进震源、抗干扰等措施的研究之后, 此法仍是很有前途的。

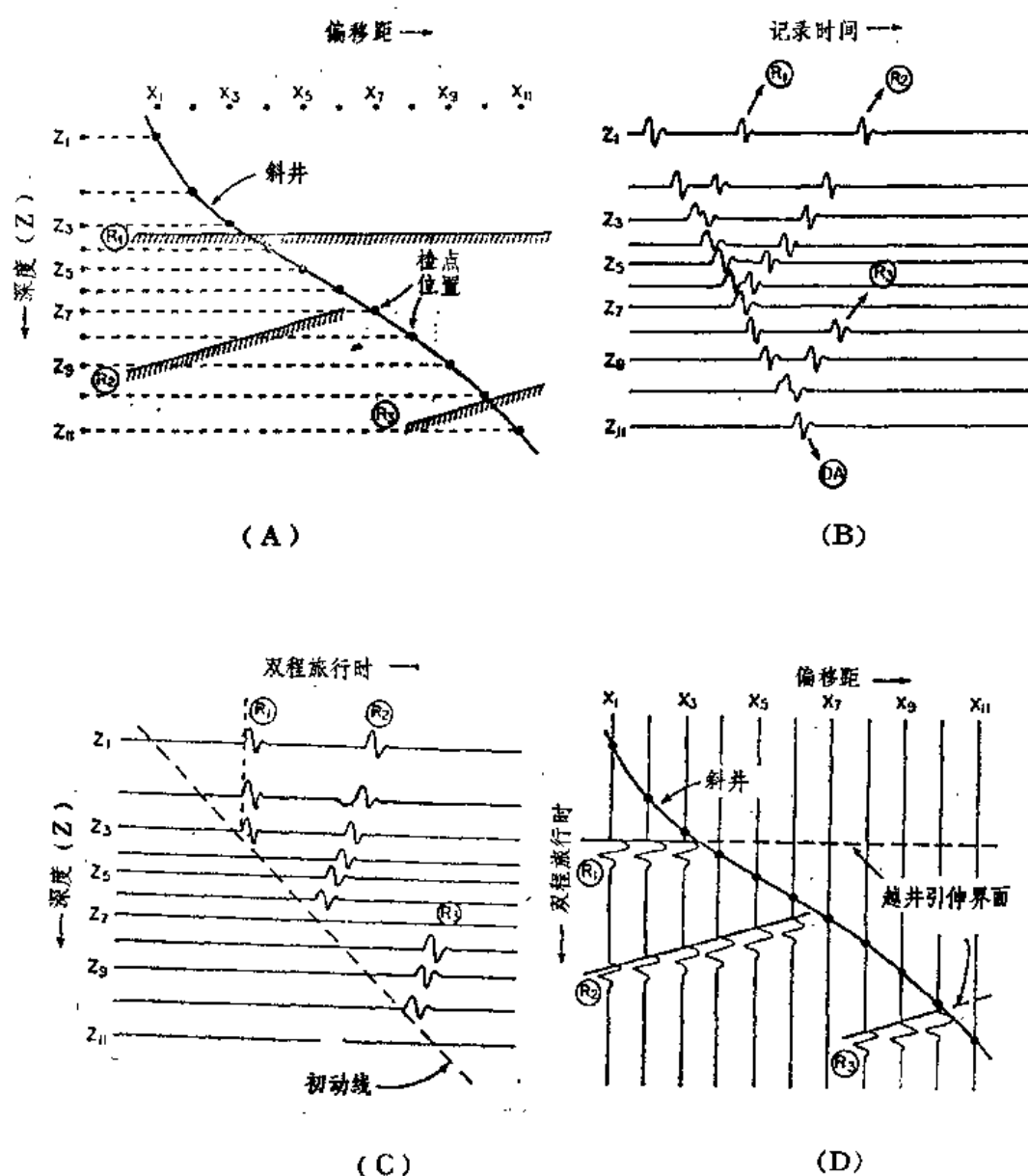


图 53 斜井VSP法观测图示意

(A) 穿越一具三反射层的斜井内检点布置示意 (B) 相应的斜井 VSP 记录图 (唯上行一次波)
 (C) 经初至波延时处理后, 换算出的双程旅行时函数图 $Z(t)$ (D) 经初至波延时处理后, 换算出的
 双程旅行时函数图 $X(t)$

(6) 薄层的反射函数与透射函数

研究薄层时, 不再能用简单的反射系数和透射系数来表示其地层学特性, 而要研究其随时间而变的反射函数 $R(t)$ 与透射函数 $T(t)$ 。这些函数之内包涵着珍贵的薄层地质学信息, 而且只有依靠 VSP 记录才能推算出来。孔隙度不同、包含流体不同的薄层, 其反射和透射函数也明显不同, 透射函数在频域内比在时域内显示得更为灵敏, 因此通过付氏变换求得透射函数的频谱: $T(\omega)$ 进行分析研究, 可具更高分辨率。

下面给出一例表明在美国波德河盆地东部红河带 (1980 年) 利用 VSP 数据计算所得高

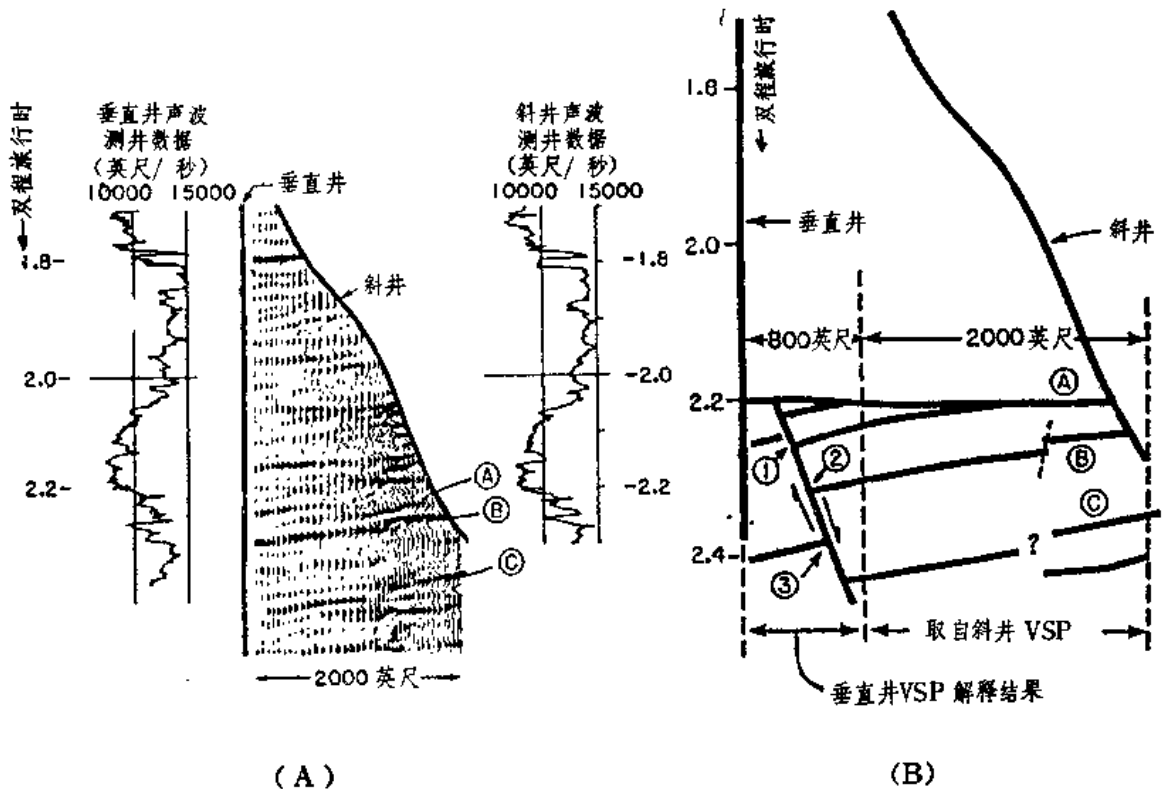


图 54 垂井与斜井VSP记录分析一例 (Kennet 与 Ireson, 1981)
(A) 原始数据 (B) VSP 数据的地层学分析结果

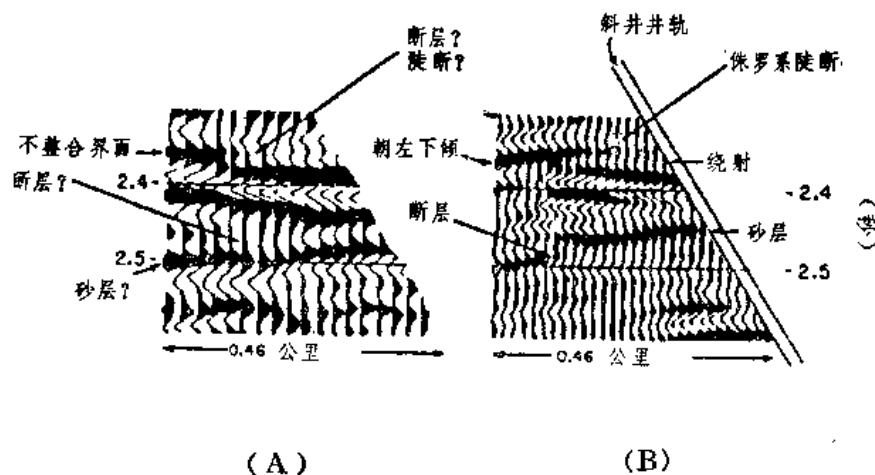


图 55 三维地震记录 (A)
与穿越不整合界面的斜井VSP记录 (B) 对比

孔隙度含水薄层与致密薄层反射函数的差别及其在地表地震记录图上的反应 (见图 57)。它表明, 高孔隙度含水薄层的反射函数幅值较大, 所包含的‘反射小事件’数量也较多。藉此可以引用到地表地震记录的分析解释中去, 勾绘出地下高孔隙含水薄层的分布概况来。

2. 横波勘探法的分辨能力

(1) 特点

从分辨率的角度看, 横波勘探法与纵波相比具有以下特点:

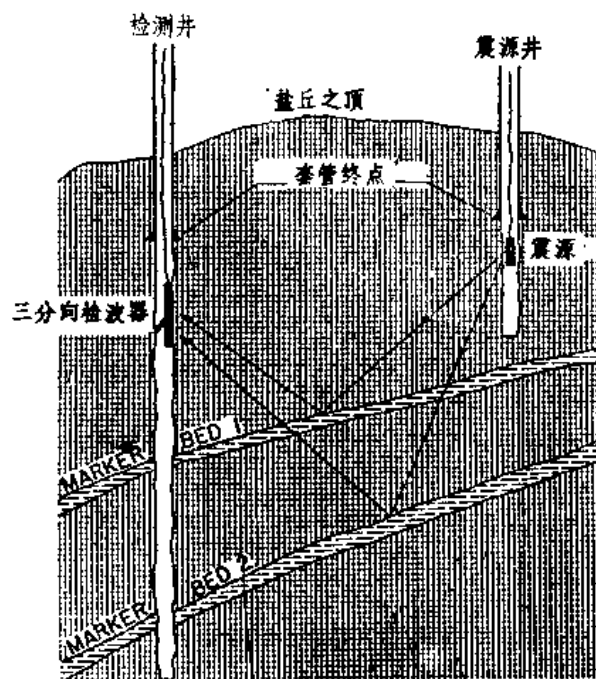


图 56 应用井下气枪进行VSP‘透视法’初试一例

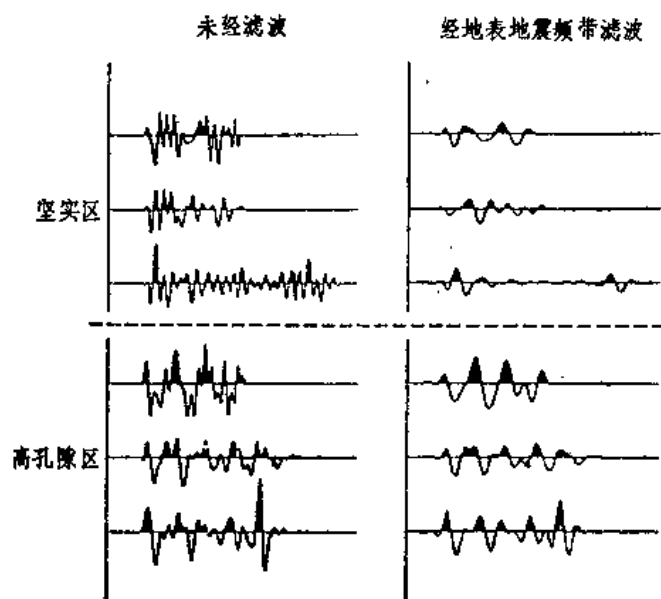


图 57 根据美波德河盆地东部红河带所录VSP数据
计算所得反射函数图 (Balch, 1980)

1) 横波频谱较宽 ($f_{max}=70-80$ 赫), 波速较低 ($V_s/V_p=0.2-0.6$), 因此波长较小 ($\lambda=v/f$), 分辨能力相对也高些, 见图58示意。

2) 横波在不均匀界面上能分裂成更多波相 (如SV、SH波), 它们各具不同极性、旅行时、频谱等, 至少能提供九个参量 (而P波基本只有旅行时与频谱二项), 因此横波可引出更多岩性变化信息, 有利于分辨小砂体、小断块与裂缝发育带。

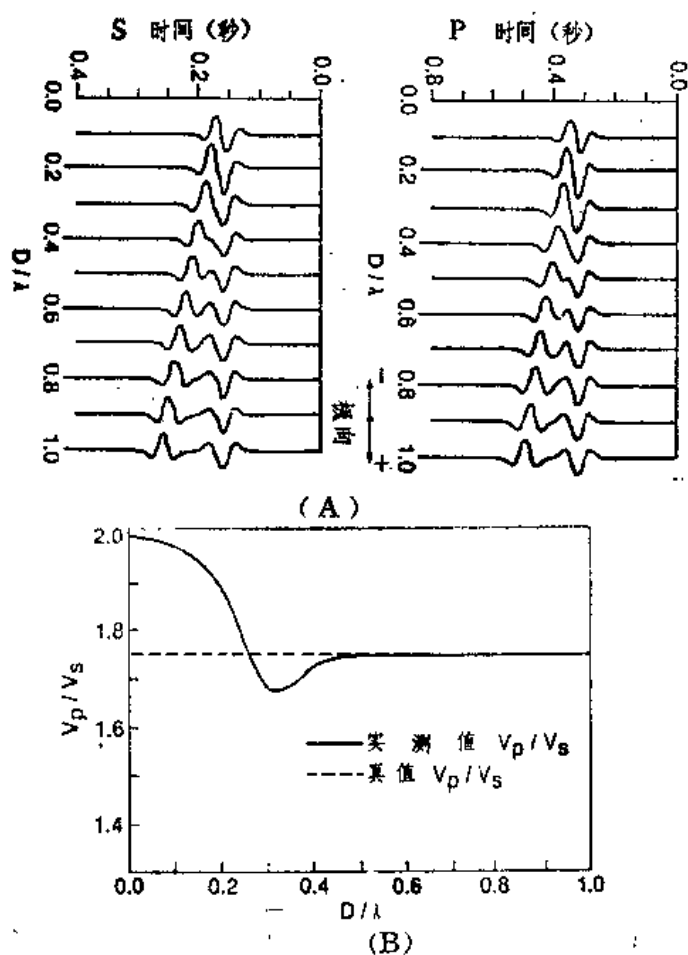


图 58

(A) 在不同相对地层厚度 (D/λ) P波与S波合成地震波形图
(B) 沿楔形模型实测 V_p/V_s 值 (实线) 与真值 (虚线) 的比较

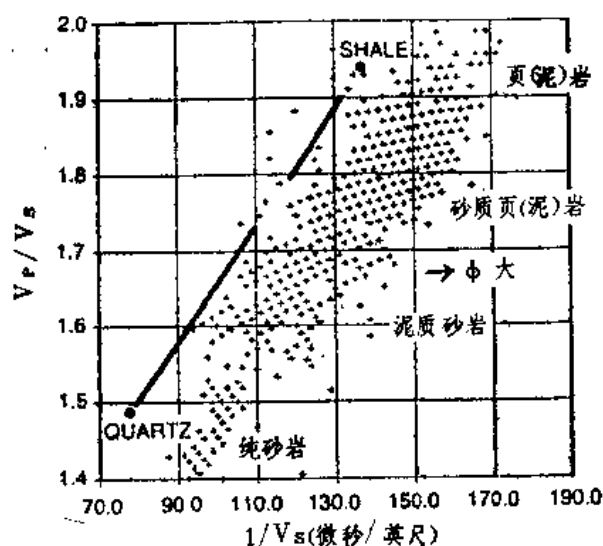


图 59 得克萨斯州Frio构造上的 V_p/V_s 相对 $1/V_s$ 的变化图 (朝右孔隙度上升)

3) V_s 的各向异性系数较大 ($K = V_{SH}/V_{SV}$ 可达 1.35), 随孔隙度变化也较灵敏 (见图 59), 有利于油气层勘探。

4) 不同岩性的泊松比值具有较明显的差别, $\sigma_{砂岩}$ 为 0.17—0.26; $\sigma_{白云岩}$ 为 0.27—0.29; $\sigma_{石灰岩}$ 为 0.29—0.33 (见图 60 示意)

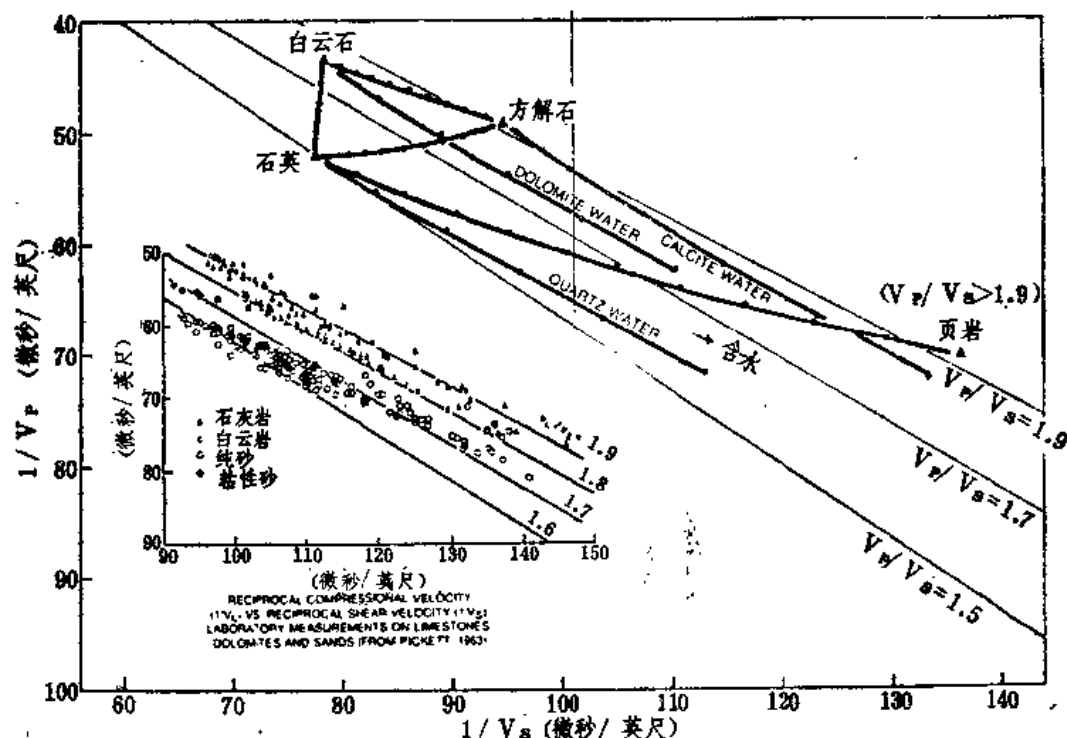


图 60 各种岩样测试结果, $1/V_p$ 与 $1/V_s$ 的变化关系

但是横波勘探法由于生产效率不高:震源尚不理想,水平检波器安置不便,剩余静校正随地形起伏甚大,需作细测以及分析处理程序尚不够成熟等原因,至今在生产中应用不广,有待改进。

(2) 显示横波分辨能力的若干实例

① 在美得克萨斯州的 Val Verde 盆地内及 Midland 盆地之内皆进行过横波法与纵波记录分辨能力方面的对比研究。前者采用的是可控震源高次覆盖共深度点记录(见图 61),后者记录了两种波型的横波记录(见图 62)。这些结果表明,横波法在分辨能力方面确实具有一定优越性。

② 在高速屏蔽层下, S 波记录优于 P 波—实例在美西 Texas 盆地内,由于局部地震存在高速层产生的多次反射和面波(瑞利波)干扰, P 波法难以取得有用信息,而 S 波由于其反射偏移距较大,用共深度点法能较好压制多次波干扰,其面波(洛夫波)也与有效波相干较少,因而取得了更佳结果(见图 63)。

③ 勘探小断层并鉴别真假含气层一例(美 Putah Sinks 油田)见图 64。

由图也可以看出利用 S 波勘探深小断层的效果。

(3) 展望

当前,“横波勘探法是提高地震法纵、横向分辨率的有效途径”这一看法已成公论。

1972 年以来苏联石油部在西西伯利亚、俄罗斯地台、近里海凹陷区及哈萨克斯坦断层带等已取得不少有用的横波与多波勘探资料,至 1980 年共计完成一千余公里横波剖面,美国在得克萨斯州西部三盆地、俄克拉荷马州 Anadarko 盆地、加利福尼亚气田及佛罗里达州西部

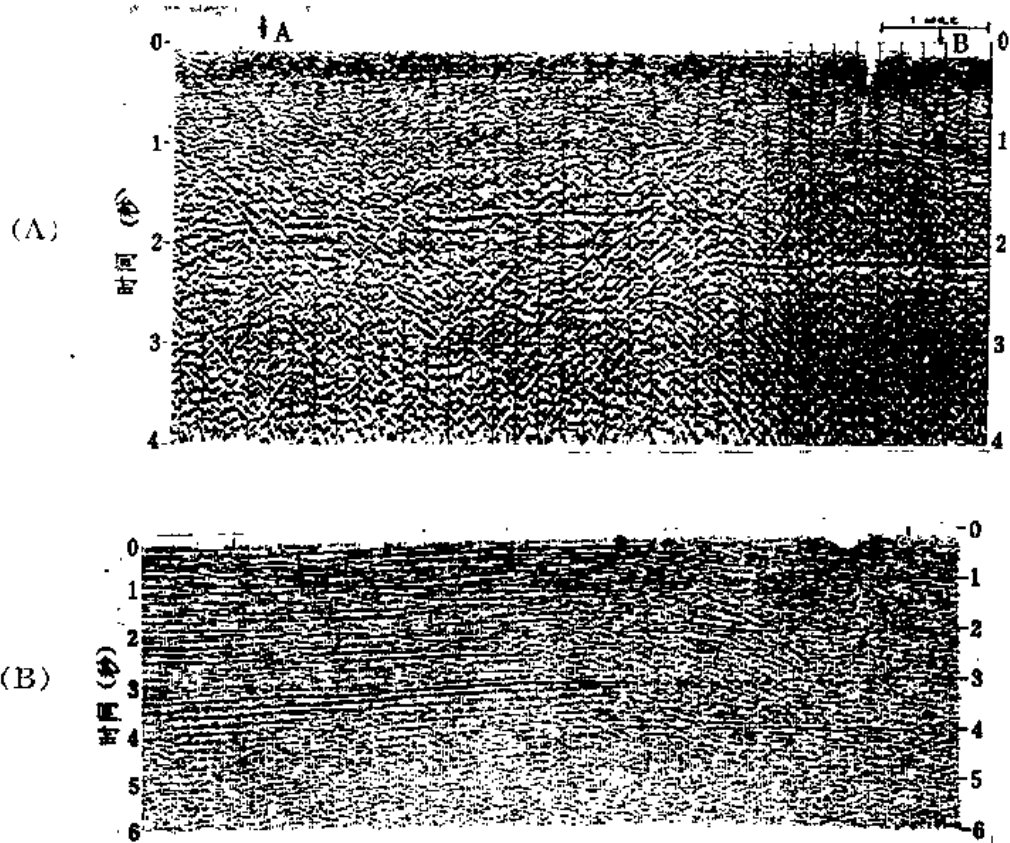


图 61 在 Texas 州 Val Verde 盆地内 48 次 CDP 覆盖的 P 波记录剖面 (A) 与 24 次 CDP 覆盖的 S 波记录剖面 (B) 对比 (皆用可控震源)

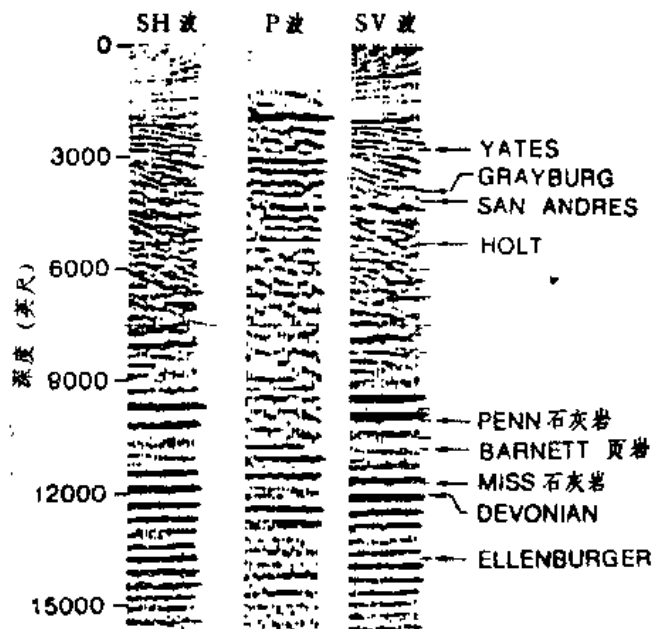


图 62 美 Midland 盆地内取得的 P 波与 S 波 (两种波型: SV 与 SH) 的叠加剖面分辨率对比

海上等地的地面、海上、井下皆进行了各类横波法的试验研究。1981 年内 12.5 队月完成

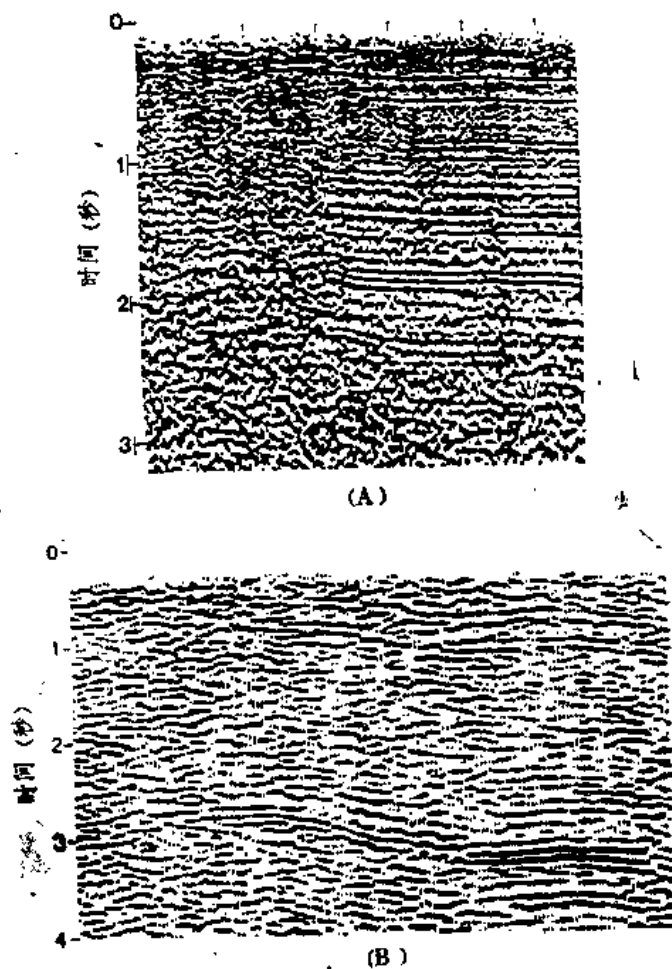


图 63 高速屏蔽层下P波(A)与S波(B)记录剖面
对比(测线左半近地表有高速层)

9600 公里剖面,1982 年 14.5 队月完成 20,800 公里剖面。

新型横波震源正不断出现,如 S 波可控震源、Mathor 式 S 波冲击震源以及 45° 角地表转换式的爆炸震源等,后者为进一步开展综合式的多波勘探提供了优越条件,由于 P 波 S 波记录出自同一震源,对比十分有利;如再结合综合式的 P、S 波 VSP 观测资料,就可进行更为精密的多参数分析研究)。今后进一步提高 S 波震源的高频成分,逐步完善处理过程、加强波场分析,定能为地震分辨能力作出更大贡献。

3. 有关“三维地震法”分辨实效的评价

三维地震法的优越性已为人们所熟知。在此只将国内、外对它在提高分辨率作用方面的实际评价与展望引述一下。

(1) 三维地震的特殊功能

不少文献指出:三维是地震发展的趋势。不远的未来,三维观测将成为地震工作的标准方法。它不仅能给出较可靠、周密的地震构造图,还能提供波动力学特性的研究,对地层岩性和其它物理特性作出探讨。通过绘制层位拉平剖面图、展开显示切片、瞬时振幅包络曲线、瞬时相位曲线和瞬时频率异常、速度谱曲线和建立三维速度模型等方法,在寻找断点、

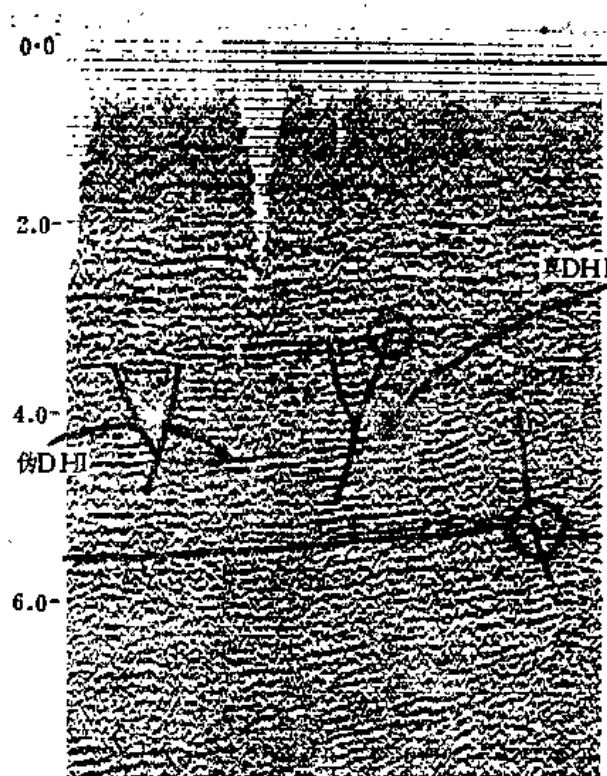
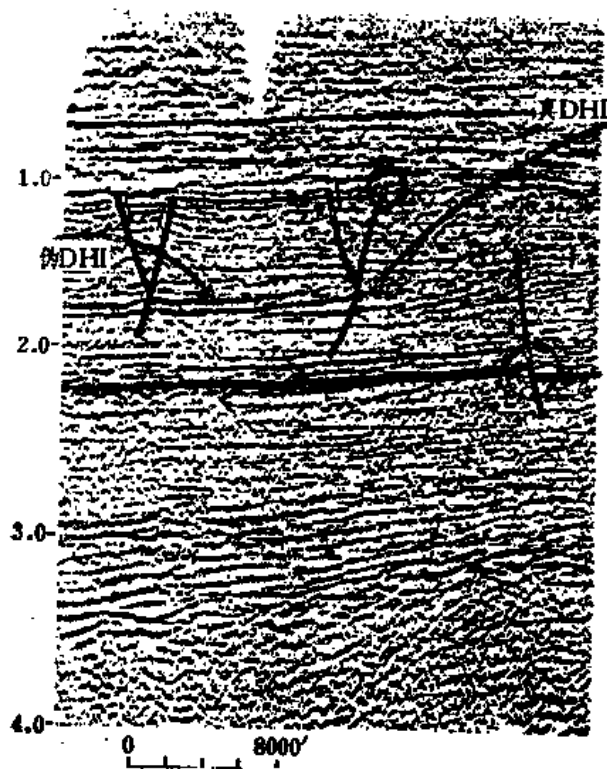


图 64 美Putah Sinks 油田利用横波勘探小断层并
鉴别真、假气层一例。(A) P波剖面图 (B) S波剖面图

辨认岩性变化、区分沙坝、河道砂、三角洲、断裂和薄层(>10米)等方面皆已显示出特殊能力。利用三维多次覆盖资料借助F-K偏移处理,对于排除剖面侧向来的各类断层、异体产生的绕射、多次波等干扰也是二维法无可比拟的,因此具有较高的纵、横向分辨能力。

在我国石油部用三维地震法已在各大油田先后开展,取得了合计约1000平方公里面积的三维地震资料,通过精心分析研究,掌握并发展了一套比较先进的软件处理技术,使得探区内的钻井定位成功率平均提高了25%。有些探区(如胜利油田)的探油成功率由原先的69%提高到了90%。缩短了复杂地区的勘探周期,降低了总的生产成本。

(2) 展望

三维地震虽然好,但目前还存在若干技术上、生产率与经济效益方面不足之处,影响其更广泛应用推广,有待探索改进。

①采集系统的合理选择与布署

常规采用的“宽带式”“束状”还是“宽十字形”的面积观测系统,都需要安排近百道、甚至上千道检波点作记录。日前国外正在试用各种能使生产效率显著提高、成本降低的新型三维观测系统,如:美国在奥斯汀使用的“双行爆破”式三维观测法^[51],就可适当加大平行测线间距和检波点距,提高工作效益;美在东部得克萨斯州居民密集区进行大规模(6英里×5英里面积,深一万英尺)三维观测中所采用的矩形炮点组合(纵间距1320英尺、横间距440英尺)构组成条(四块一条)、横移条带(九条)的覆盖式采集系统,就可使炮量比常规布署减小2/3(约合每平方公里上不到27炮)而空间采样密度保持不变(220'×110')^[52]。加以采用了先进的遥测记录设备,可以不用电缆(每排列节约电缆25英里),将304道地震检波信息分组作记录,称为SGR记录法。此外,国外还正在研制千道的遥测仪器和光导纤维(一线传多道信息)的传输仪,或用高密度的光盘记录来代替现用的数字磁带记录仪,这些都将为三维地震法的推广应用开通新的渠道。

②分析处理技术的提高

不论是采集手段、软件系统和显示方式,三维地震都是独具一格,其解释过程更为复杂,技术上仍然存在不少急待解决的问题,如对过薄(<10米)岩层的勘探效益尚不理想;在信-噪比值较低的地区,“画弧”现象有时还较严重;对碳酸岩裂缝带的勘探与直接找油气方面也尚未突破。今后只有加强资料质量的严格管理、步步核实,进一步提高时间分辨率和空间分辨率(可用内插法)、提高信号频率,充分利用测井和地质资料,加强三维速度场模型的研究,反复迭代修正进行偏移,以提高其精度,并加强对波动力学特性的综合对比研究,才能进一步提高其勘探实效。

③成本降低的某些途径

据国外记载(1984),陆上三维地震的施工处理费用在六次覆盖的情况下平均是:每15平方公里花费100万美元(约合6.6万美元/平方公里^[35])。

在我国,根据江汉高场油田1984年的统计:在32.6平方公里的三维勘测面积上,66日共放3860炮(约合116炮/平方公里),共耗资93万元(其中野外采集61.5万元,处理费31.5万元,约合2.85万人民币/平方公里),这相当于钻一口二千米深钻井的费用。相形之下,我国三维勘探成本较国外低。但国外近年来也有一些地区,在采用三维—二维相结合的方法^[51]进行观测和处理以后,既提高了勘探分辨率,又保持较低成本(约合单位采集成本:9,645美元/平方公里,和单位处理成本:12,997美元/平方公里,合计成本为22,642美元/平方公里

里)。看来这是值得借鉴的一条途径，其中遥测分组自动启停记录系统的应用，对于提高生产效率，降低成本，尤属必要。

总之，在现有的技术水平下，三维技术主要是应用在较大油田的开发阶段，在已经证实油藏规模较大，地质结构确实复杂、二维地震确已无能为力时，才在开发和探井详查之前做一次三维地震勘探，以提高打井的成功率。随着三维勘探技术的迅速改进，它在生产中的应用范围将日益增广。

第三部分 勘探实例

一、在苏联推行的一种“高分辨率地震勘探法”实例^[31]

为进一步探明非背斜构造,提高“三小”的勘探精度,在苏联的第11个五年计划期间正在研究与发展一套“高分辨率地震勘探—详查物性的地质剖面”(ВРС-ДИФСР)工作方法。它包括从野外勘探、分析处理到地质解释在内的一整套技术系统。在野外观测中,它十分强调加宽信息频带,减小波形失真;分析中重视动力学特性的应用;解释中反复将地震资料与各种测井资料进行综合性的对比分析与研究。

下面列举一些初步运用这套方法所取得的成果:

1. 宽频带信息的取得

在Прибалтийский向斜中的试验表明:要想取得2公里深度下目的层的宽频记录(f 达120赫)可以采用井下热气枪或小炸药量(<1 公斤)多炮迭加作为震源,组合检波距不得超过20米(10—20米)。检波器最好是埋在风化层下并加水埋好(这一措施可使视频率提高30—80赫,并大大减小低速波干扰)。生产中实际上大部分是选择优质粘土层埋藏检波器的。一般采用200道地震仪作记录。

处理中对原始地震信息禁止使用频率滤波,而是采用最佳多道滤波与“对应相减”的方法来排除多次波干扰(可削减20—40分贝),力求保持宽频带,避免一次波波形失真。

为了保持高频成分,必须大大提高静校正的精度(0.5—1毫秒),这主要依靠辅助浅井网的观测结果。

为防止处理中波形畸变、频率变低,同样要求提高动校正的精度($<3-4$ 毫秒),这要求迭加速度取得准确(误差 $<0.5-1.0\%$),为此采用了随时间变化的(t)波速谱与随水平距离变化的(x)波速谱作多道对比的方法来选择相符最佳的数值。通过最小相位反褶积处理就能提高实际地震波的频带宽度,再经过动力学程序综合处理(ДИНПА),大大减小或消除了地表、仪器、波场与深层因素对波幅的影响以后,使得清晰可见的地震信息频率在 $t=2$ 秒处高达100—120赫,地震剖面上的分辨率明显提高(见图65、66)。

2. 地层反褶积(СД)法的处理效果

在西西伯利亚 Шаимский 地区,地质条件较复杂。在利用上述一系列提高分辨率的措施之后又进行了地层反褶积处理以取得反射系数分布剖面图,由此又推算出了波速图及声学剖面图。从而成功地勘查得了目的层(产油)的尖灭图,再经过详细研究个别薄层(10—15米厚)区范围内的层速变化细节,结合钻井资料,就可预测出互薄层组内部的岩性变化来型(模示意图67)。

所谓地层反褶积是在取得高分辨率动力学剖而后的下一处理步骤(由全苏物探研究所 ВНИИ Геофизика 设计)它能保证进一步扩大频谱,消除信号的剩余非零相位成分。程序内运行一维纳滤波算子,使得地震剖面中最靠近深井的那一道地震记录经处理后取得的一次反射单道脉冲能最接近深井内观测道计算所得。然后将这一算子用于全部时间剖而上,就可取得最近真实的伪脉冲反射系数图。

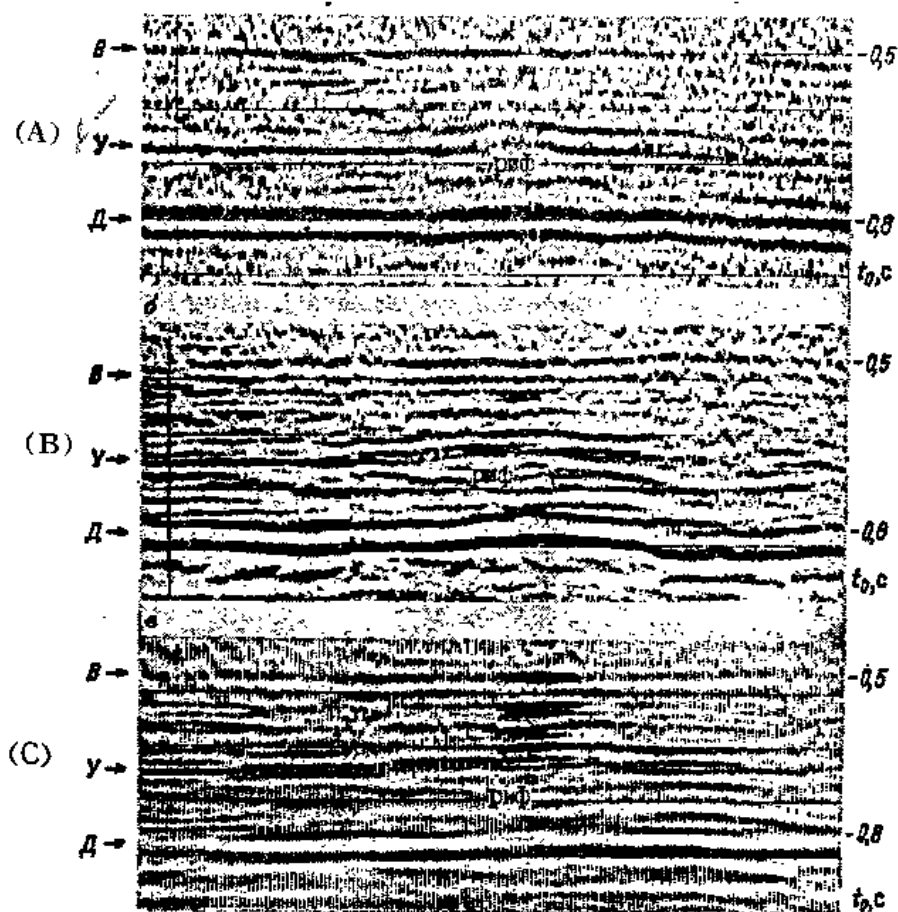


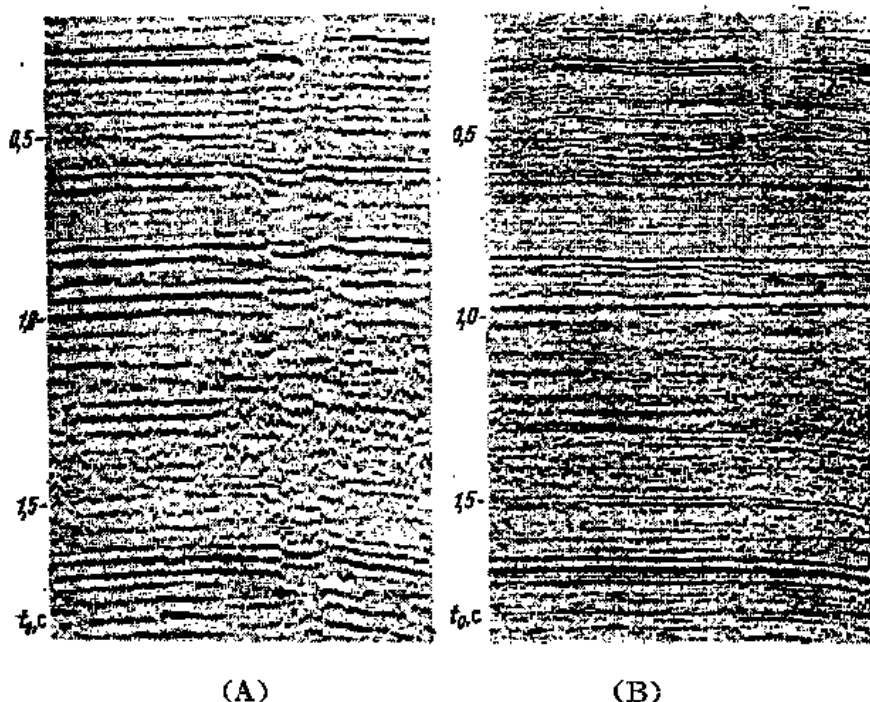
图 65 应用高分辨率地震法(BPC)所得共深度点地震剖面信息量的提高

(A) 常规野外观测与处理结果

(B) 高分辨率法野外观测与常规处理结果

(C) 高分辨率法野外观测与高分辨率处理结果(恢复原振幅)

B层—Bepeck层; Y层—石炭纪含煤层; D层—泥盆纪反射层



(A)

(B)

图 66 在采用高分辨率地震法一系列措施以后, 共深度点地震剖面分辨率的提高

(A) 常规地震法

(B) 高分辨率地震法

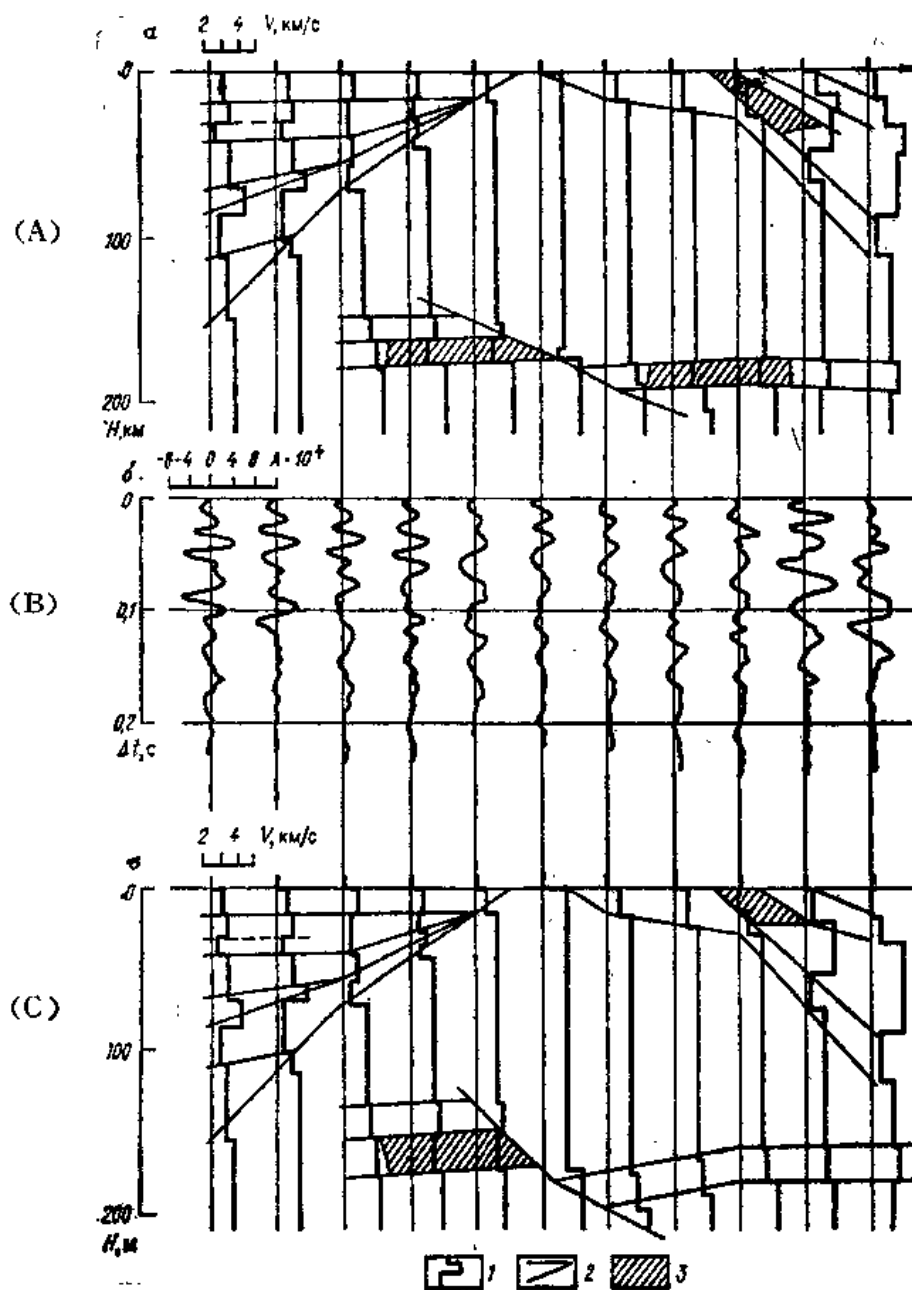


图 67 利用层速变化勘测复杂地区的薄层分辨模型示意图

- (A) 原始介质模型
 (B) 共深度点时间剖面 (真幅值)
 (C) 根据地震剖面反演所得介质模型图
 1. V_m (深度) 曲线图
 2. 分界面
 3. 油气藏

3. “介质模型选择法” (ПМС) 的处理效果

在取得高分辨率的反射系数分布图以后, 为了进一步确定互薄层的物理特性, 苏联物探所进一步采用了ПМС法。如前所述, 此法能充分有效地利用地质观测井 (ГИС) 的资料, 并纠正动力学反演的不准确性。在西西伯利亚东部Тарасовский地区, 利用ПМС法详细研究了产油层复杂构造的速度分布状况, 并沿测线预测了岩性变化, 结果见图68。

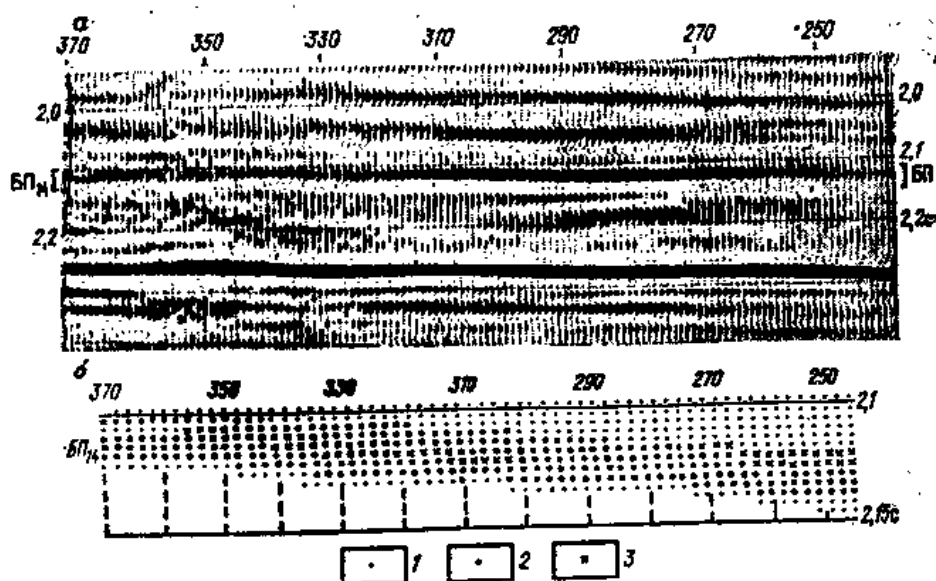


图 68 在西西伯利亚东Тарасовский地区利用介质模型选择法(ПМС)预测地下岩性变化的结果

a) 共深度点时间剖面图 b) 预测岩性剖面图

1. 泥岩 2. 砂岩 3. 沙-泥沉积岩

二. 高分辨数据采集的实例^[50]

在加拿大艾伯塔 (Alberta) 南部一油藏勘探实例表明: 只要提高地震信息的高频率成分, 适当减小组合检波内的点距, 就可以大大提高分辨率, 探明 1000 米深度下的含油薄砂透镜体 (厚度 3—7 米)。这种砂体属白垩纪海相沉积, 位于古生代不整合面之上。由于砂石层油藏是海进式海洋序列的一部分, 因而与海相页岩紧密联结。加以砂岩的孔隙度很大, 单独依靠声波测井资料就很难将它与页岩分辨开来。只有依靠进一步提高地震勘探的分辨率来解决这一问题。

按照薄层定义, 直观分辨的极限厚度是 $\lambda/4$, 已知目的层深度下的平均速度是 10,000 英尺/秒, 要想分辨 5 米左右的地层, 要求信号频率 >83 赫。为此必须采用高分辨技术。

最初采用的是线性可控震源, 扫描范围 (朝下) 72—12 赫, 持续时间 16 秒 [见图 69 (A)] 震源组合由 4 台可控震源组成, 组合距 330 英尺, 组合检波由 11 个检点分布在 220 英尺距离内——这是一套野外常用的高分辨采集技术。但是所取得的记录不能满足需要。

接着试用了一套新采集技术, 采用的是非线性扫描的可控震源组合, 由三台可控震源组成, 组合距 110 英尺, 扫频范围 (朝上) 14—100 赫。扫描频率与时间的平方根成正比: $f=14(1+2.172\sqrt{t})$ (或称以三分贝梯度上升), 持续时间 8 秒 [见图 69 (B)]。事实上, 缩短扫描持续时间并不会降低记录质量, 而且能加速操作过程。这种非线性扫描比线性扫描具有两大优越性: 1. 频率范围的扩大 (72→100 赫) 能提高分辨率。2. 由于扫描非线性, 使得扫描中的一半时间是在高频范畴内振动 [见图 69 (B) 中虚线示意]。

另一项提高 (横向) 分辨率的有效措施是减小检波器的组合距: 40 英尺上 9 个检波点 (检波点距 5 英尺)。

资料采用的处理过程与前相同——即常规高分辨技术用的 Seislog 反演程序 (Teknica Resource development Ltd)。它包括以下五个步骤: 1. 野外资料的真值恢复; 2. 迭加前频

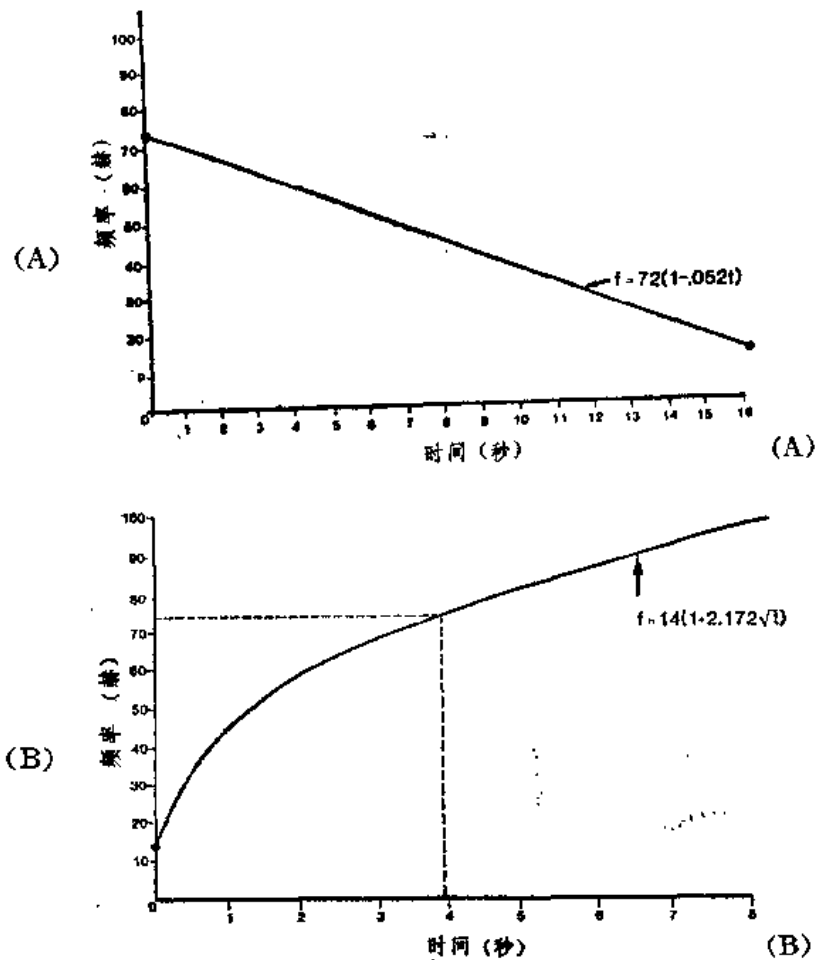


图 69 (A)可控震源线性扫描图(72→12赫)
(B)可控震源非线性扫描图(14→100赫)

域反褶积；3. 迭加过程中的迭代式剩余静校正与求速计算；4. 迭加后再次频域反褶积；5. 频域偏移处理；最后对偏移后的地震道进行反演—要经过密度补偿、结合低频波所测的速度情报进行。低频波速信息取自地震层化波速与声波层速测井资料。处理结果以等走时图显示，并用彩色区分可能的岩性差别。

最后还进行了一系列效果对比；未迭加的、迭加的、偏移后的剖面以及最典型的两种记录的反演结果。

图 70 是同一段测线，用两种不同扫描和接收方法取得的结果对比。剖面显示的是采用同一处理流程，处理到迭加为止的结果。

从图上鲜明可见新采集技术所产生的卓越高分辨效果。目的层在新剖面上清晰可见。通过反演还可以准确定出砂层的厚度和位置。

在剖面中心，地震道的净化效应也极好，下一步偏移处理后还可将侵蚀面产生的绕射波也进一步排除。

这一实例明确指出：可以在实际工作中大大提高所录地震波的频率成分。可控震源由于具有任意控制频率成分这一优越性，使其有效频率可以大大超过炸药震源。

总之，合理设计可控震源的记录参量，在高分辨率地震技术中是绝对重要的。

另外，在交通不便地区，采用浅井（风化层下）小炸药量震源（60—120克）、单检波点

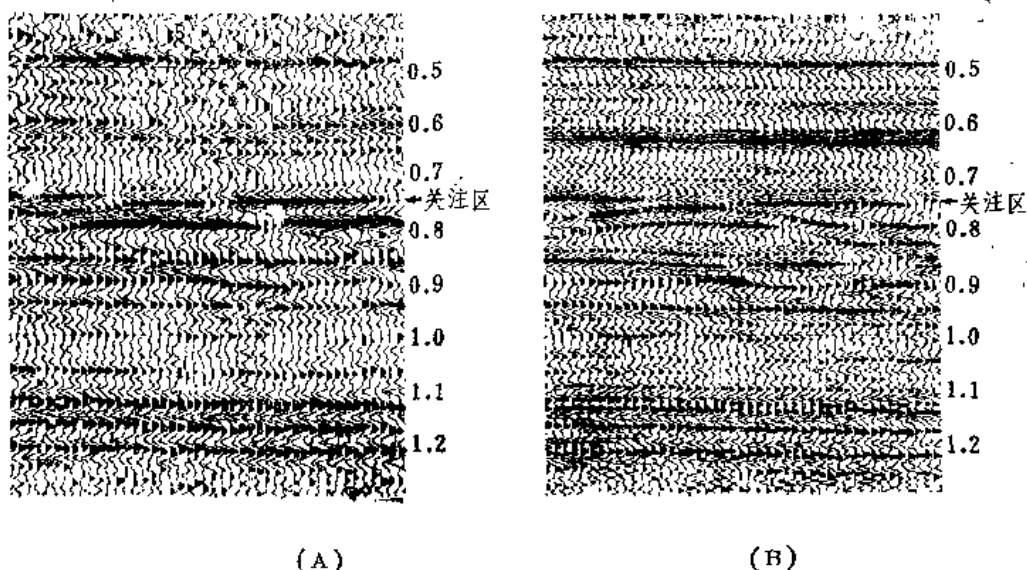


图 70 用“新” (B) 与“老” (A) 两种采集方法所取得的同一测线段剖面对比 (偏移前迭加结果)

接收、小检距 (12米)、高采样率 (1ms) 的 24 次覆盖地震剖面上也可清晰分辨出 800 米深度下的小断距 (5 米) 断层及 1500 米深度范围内的薄煤层 (5—10 米) 来 (图 71), 详见 [63]。

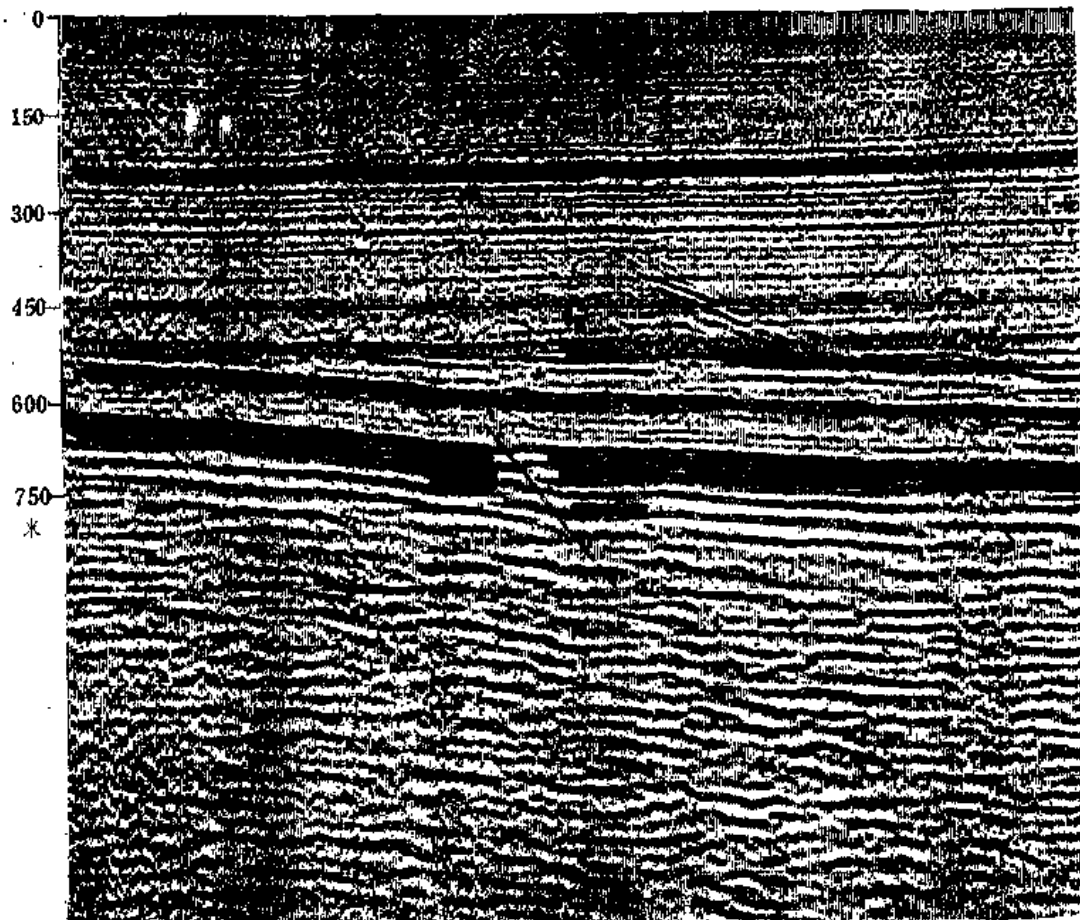


图 71 小炸药量、单检波器观测所得高分辨率地震剖面解释图一例^[62];
 勘得四个薄煤层及剖面中部一个 5 米断距的小断层 (剖面长 1500 米)

三. 利用真幅值地震波形特征分辨薄层数例

1. 美国新墨西哥州西北部的圣胡安盆地是著名的高产油气藏。油气藏主要出自侏罗纪的一些地层圈闭型砂层。1974—1981年间主要依靠地震法成功地探得侏罗系E砂层 (Entrada) 的六个新油田。E砂层主要是风积岩, 覆盖其上的薄T层(Todilto) (由石灰岩与硬石膏组成, 厚度仅3—10米) 则属于大面积分布的陆相盐湖沉积。根据地质学家的分析: “凡是在T石灰层内含有有机物质较多, 其上又覆盖着硬石膏层的地区, E层储油就多” 是一条已经实际验证了的规律。为了查明深度在1500—2500米范围内的目的层 (包括E、T层) 分布情况、弄清其结构, 地震勘探采用了六次覆盖的真幅值记录。主要依靠反射波幅值和波形的细微变化识别出了薄T层的存在与E砂层厚度的变化。E砂层在地震图上的反映是, 在E砂层顶部出现一周期为21毫秒 ($\lambda=42$ 米) 的反相地震信号, 当E层由薄变厚时, 其反射信号将由单峰转变成为双峰脉冲; 薄T层的反射信号波幅随着其厚度减薄, 将逐步减小, 在最薄处形成“暗点”。在E砂层与T层之上的S层间的反射波距离也会缩小3—14毫秒 (见图72、73)。参照这一套识别薄层的方法, 根据总长1290公里的地震普查资料, 求得了E、T层的分布结构与厚度变化、波速分布资料, 再结合地质模型实验与分析结果, 选择了符合储油规律的构造、圈闭, 尽快打下探井, 证实了勘探结果的正确性 (详见文献[52])。

2. 在加拿大 Alberta 的白垩纪 Cardium 结构层中, 油气出自自由海岸与陆棚沙洲沉积构成的薄层地层圈闭, 它们在地震剖面上显示为“铁轨”状的反射界面。C层 (Cardium) 又可细分为C砂层与其上的C覆盖带, 二者的厚度皆在15—50米范围内变化, C砂层由滨海沉积一成块的砂石层朝末逐步变成夹杂在页岩中的砂石薄层, 而其上的C覆盖带则由滨海/内陆沉积一夹在页岩中的薄砂石层 (厚度<10米) 朝末逐步变为陆棚沉积一页岩层。

C结构层在地震剖面上反映出两类波形: 在C砂层或C覆盖带的厚度大于24米时, 出现高幅值的双峰反射, 两峰相距20—30毫秒; 在厚度低于24米时, 出现的是单峰反射 (见图74)。

在仔细研究其波幅的细微变化以后, 还可分辨得更细。将地震信息与声波测井资料结合起来, 就可以识别出地震反射的沉积层位, 并利用C砂层与C复盖带的厚度与数量等参数构造地震模型、绘制优质薄砂地层圈闭的构造图来^[45]。

3. 美国北 Dakota 中、北部的密西西比 Mission 峡谷构造大多属于缓鼻状结构的地层圈闭。油气藏一般出自构造内坳陷地带的多孔碳酸盐岩层, 圈闭的顶部和四周常由硬石膏为主的盐沼沉积所封闭。由于含油的多孔石灰岩层很薄 (10—20英尺), 其白云石化 (无孔隙) 的程度和分布状态皆无规律, 因此难以勘测。但是通过有针对性的 (针对已知同类油田的模式) 大量地震模型实验与少量测井资料的分析以后, 表明了利用地震波形探明多孔薄石灰岩层分布地带的可能性。81—82年间依靠高分辨率地震勘探, 在三个油区内, 探得了多孔碳酸

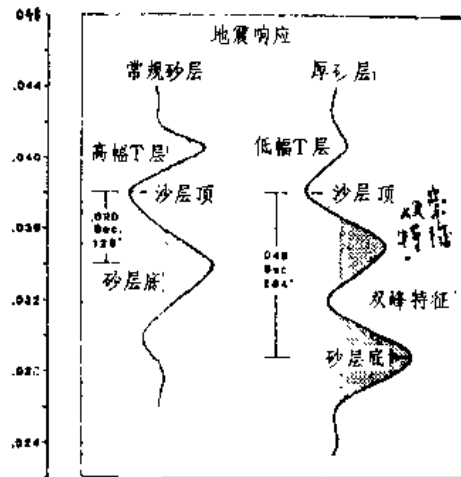


图 72 E层厚度减小与薄T层厚度增加时反映出的地震信号细微变化

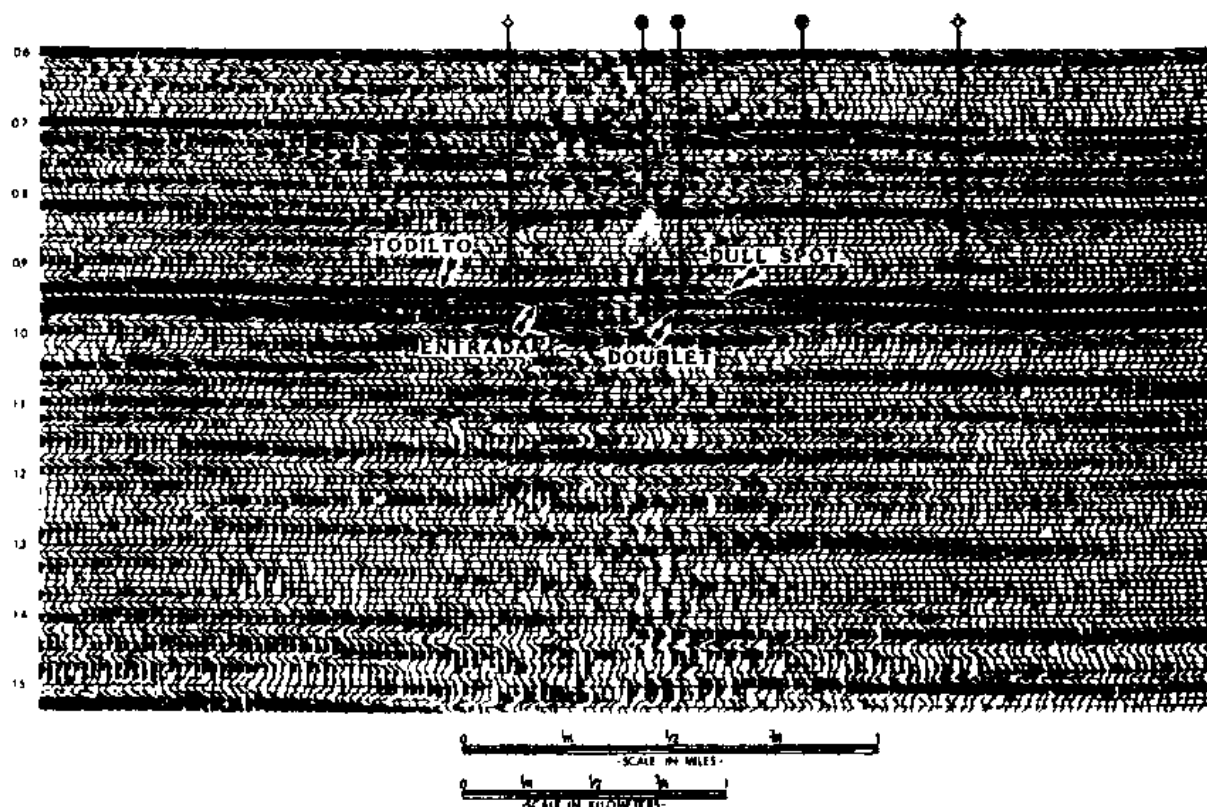


图 73 圣胡安盆地内横跨Media油田的3号地震测线剖面图（一例）

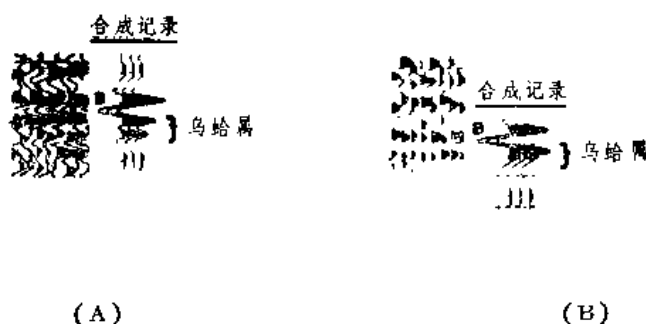


图 74 利用地震反射波形变化识别Cardium 砂层的厚度变化
(A) 厚Cardium 砂层 ($d > 24$ 米) (B) 薄Cardium层 ($d < 24$ 米)

盐岩层的圈闭所在，成功地提供了三口井位。

模型实验中，将石灰岩层的厚度从 5 英尺变到 30 英尺（间隔 5 英尺）、孔隙度从 2 % 变到 20 %（间隔 1—2 %）、实验中采用的雷克子波频率从 35 赫变到 65 赫（间隔 10 赫），取得的大量数据表明：当孔隙度为 9.5%、子波主频为 35 赫时，最小分辨率是 14 英尺（频率为 45 赫时为 10 英尺）；而当孔隙度为 6 % 时，子波频率升为 45 赫时的分辨率也只有 14 英尺。

在实际地震勘探中，采用了可控震源（ $f = 12—96$ 赫），96道地震记录，组合检波的长度是 110 英尺，组合距也是 110 英尺、炮点距 110 英尺，48 次覆盖。取得的资料进行了高分辨处理。1981 年以后，进一步采用了非线性扫描可控震源、短距组合检波、折射法高精度静校正与处理中的白化噪声谱的更熟练运用，取得了分辨率更佳的勘探结果。实际结果与地震观测结果分别见图 75、图 76。

图上显示出了地震波形随着多孔石灰石薄层的白云石化（无孔）所引起的波形变化：前者的反射波振幅畸变、减小（受到反相脉冲的影响），后者出现大幅尖峰脉冲。

此外，在美国 Montana 的 Samatra 油田附近的地震地层学分析实例也表明：可以利用在横跨河道沉积（含油层）处地震剖面上波形特性的细微变化（为波幅、反射波主瓣与旁瓣间的关系变化、相位变化等）来识别下 Tyler 河道储油砂体与泥石层（mudstone）间的差别，再结合河道在地震剖面图上显示出的不整合面及等厚图上的异常，就可以探明河道沉积的分布情况^[66]。

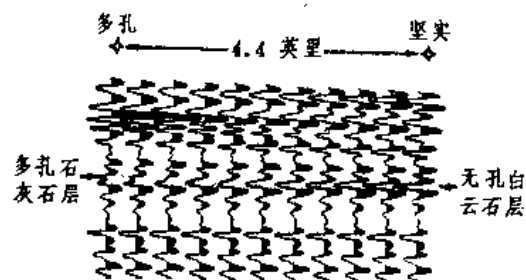


图 75 Haa 油田内沿 H-C 测线石灰石岩层转变为白云岩层所引起的波形变化（实验中所用雷克子波频率为 45 赫）

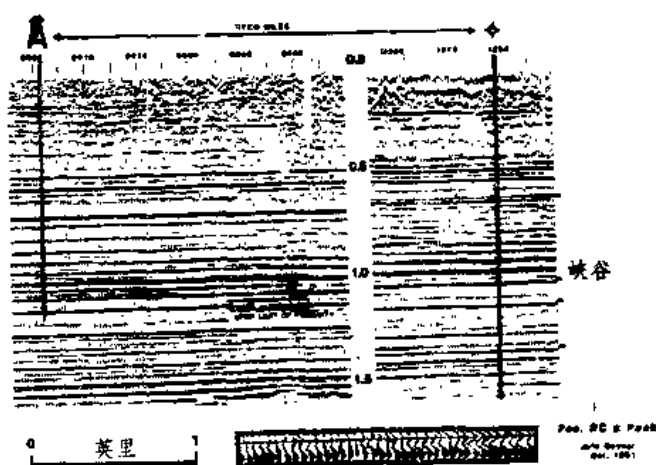


图 76 东 Williston 的一条实测地震剖面示例

四．应用VSP资料探出小断距断层二例

1. 偏移 VSP 法一例

1983 年秋在纽约州 Chautauqua 地区西南完成了八口完井。这些井分布在一个 11×2 英里的北东-南西走向的断层带上。油气出自断裂的下泥盆纪 Onondaga 灰岩（O 层）和上志留纪 Akron 白云岩（A 层）。断裂带中油气储量估计至少有 200 万桶。断层是以 70° 角朝北西倾斜的逆断层，开发很不规则，高产井往往就在于井附近。因储油层与裂隙的存在密切相关，有必要在已有井内开展有偏移的 VSP 法观测来探明附近的断层分布情况。

在作 VSP 观测以前，利用模型技术设计了一个垂直落差为 100 英尺的断层模型，以渐近射线理论为基础，运算出了 P 波垂直分量的地震图（检波点距取为 75 英尺）。它表明该断层形成的 O 层反射波时间错动约 15 毫秒，可以分辨。

在实际的偏移 VSP 法观测中，进一步减小了检波点距（40 英尺），采用了二台 Mertz12 型可控震源。根据经验，采用扫描长度为 11 秒、ff=12—105 赫的对数升频式扫描可以获得最佳分辨率。其中省去了 60 赫的陷频滤波，采样率为 2 毫秒。

井下检波器用的是一个三分量的 Geolock™H 型仪，其上装有 10 赫的 SM4 型传感地震

检波器。井的直径是8 $\frac{1}{2}$ 英寸，用134磅的力使探头两臂抵住井臂，耦合良好。为了能精确确定速度函数以利解释，采用的是偏移VSP（震源距井口3600英尺）与“零偏移”VSP（震源距井口约330英尺）同时记录，分别采用了12次和6次扫描迭加，79个测点记录了17个小时完成。

“零偏移”资料处理分以下几个阶段进行：

（1）预处理阶段：多路解偏、按深度分选地震道、提取初至时间并将它改用绝对垂直时间表示、编辑地震道、球面扩散校正、增益恢复、分析资料的速度与频率、研究资料特征。

（2）处理过程：将上行与下行波分离并拉直，反褶积（频谱均化）、上行与下行波分别迭加。

大多数VSP都是利用下行波（P波）进行整形反褶积。在此实例中，由于下行波很短（20毫秒）且近乎对称，因此可用不改变相位的简单频谱整形法取得良好的尖脉冲形子波。

有偏移的VSP处理法较前者（‘零偏移’VSP）增加两个计算程序：

（1）利用f-k窄带滤波器将P-S转换波与P-S绕射波滤除。

（2）以‘零偏移’的初至为反演基础设计一速度模型，用此模型对每一测点计算时差速度函数并作静校正。

分析解释的结果（见图77）表明，在距井470英尺处理的O层顶界存在断层，其垂直落差为50英尺，井位于下降盘上（详见〔67〕）。

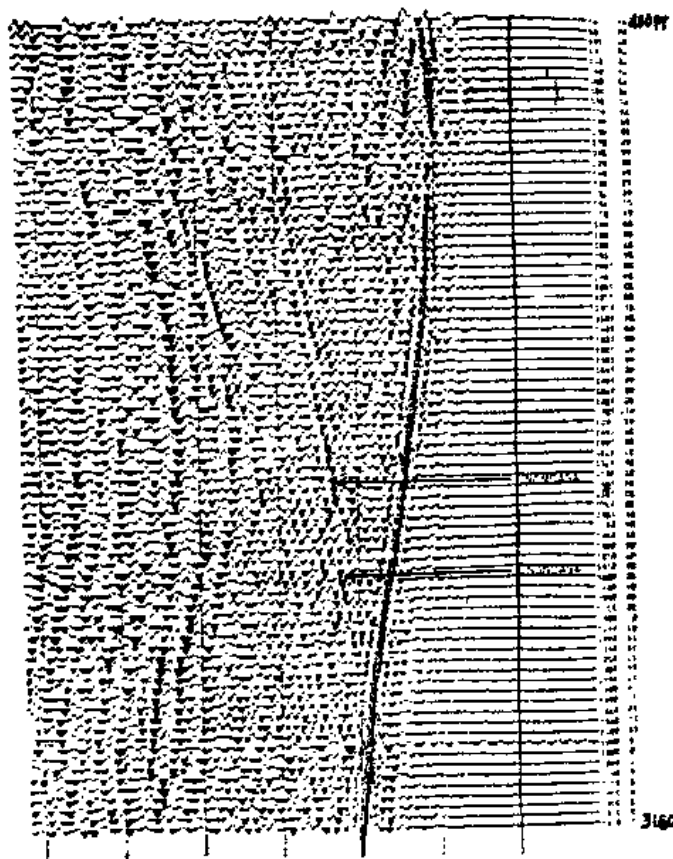


图 77 偏移距为2600英尺的VSP记录经反褶积处理后结果

2. 斜井VSP法一例

在北海油田断层多、渗透率高的Piper层油藏区内，利用海上平台已有的丛式斜井（七口）进行了海上斜井VSP观测，结合穿越井区的少量地表地震观测资料（二条测线总长约

7.4 公里), 在对该断裂区的复杂地层结构进行了细致研究以后, 纠正了井位, 提高了产量; 又利用另一斜井内的 VSP 观测结果对已有的地震测线资料重新处理后, 明显提高了分辨率, 扩大了可能的油藏范围。

海上斜井 VSP 法中采用的主要设备有:

一条具航海定的系统的海上震源拖船, 震源有两种: 单气枪型(容量 40—300 立方英寸)或是双枪协调组合型(容量 40—80 立方英寸), 气枪信号需用一近地表的检波器作监视, 与井下的 VSP 信息同时作记录。

采用了三分向的井下检波器, 用陀螺仪定向。在斜井观测中, 海上震源与井下检波点所取的平面位置相同(误差不超过检波点深度的 $1/40$)。

VSP 资料的处理流程与地表地震资料结合 VSP 结果的重新处理流程分别见图 78、79。

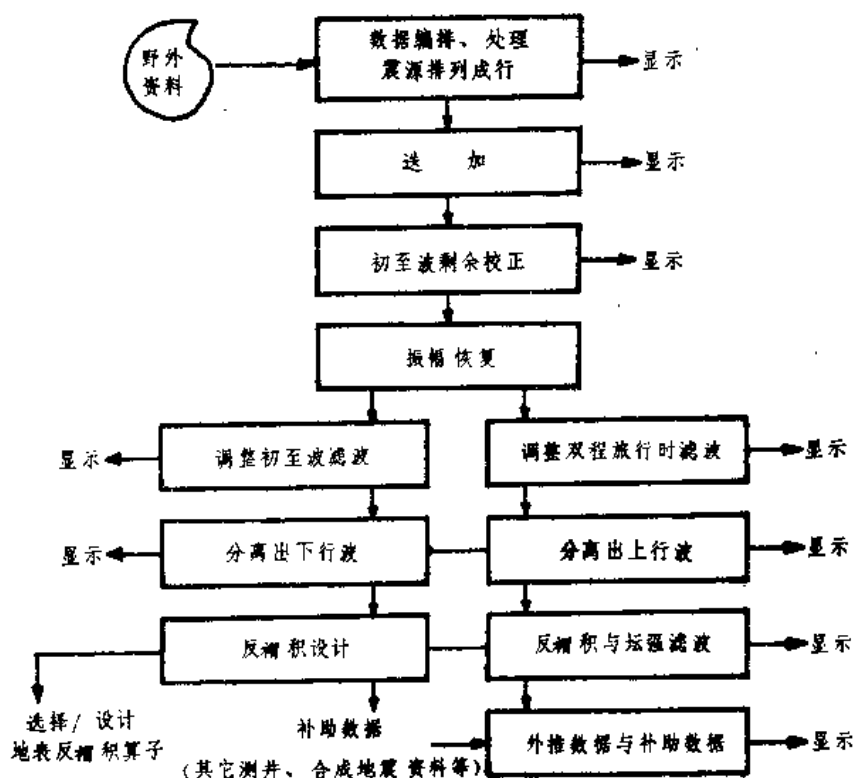


图 78 标准 VSP 法处理流程
(美地震服务公司用)

处理结果比较显著的二例是:

①P35 井 VSP 的斜井剖面图(图80)显示出了大、小三个断层及分辨清晰的四个地震反射层(1.85、1.78、2.0与2.22秒), 纠正了过去地震解释上的一些错误, 重钻一斜井代替 P35 井, 使其朝北移动 1000 英尺后穿越了断层 C 下降盘的 Piper 砂层后, 取得了 6.5×10^3 桶/日的原油产量。

②P38 井是一口高度倾斜的深井(井深 5547 米, 井底与井口平台横向相距 5 公里, 最大井径倾斜 69.5°)。利用 VSP 法不仅提供了一段高分辨率的地震剖面图(图81), 纠正了过去的错误解释, 显示出大、小断层三个; 而且利用该井 VSP 所得子波资料, 对旧的地震测线资料重新进行了反褶积处理以后, 使得分辨地层微小倾角变化与确定小断层位置的清晰

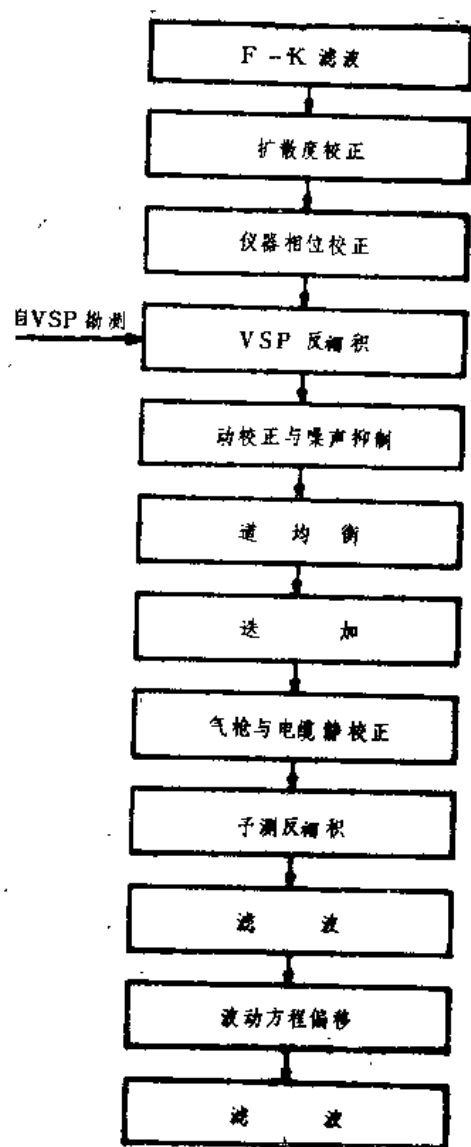


图 79 利用 VSP 子波反褶积的标准海上地震数据处理流程 (美地震服务公司用)

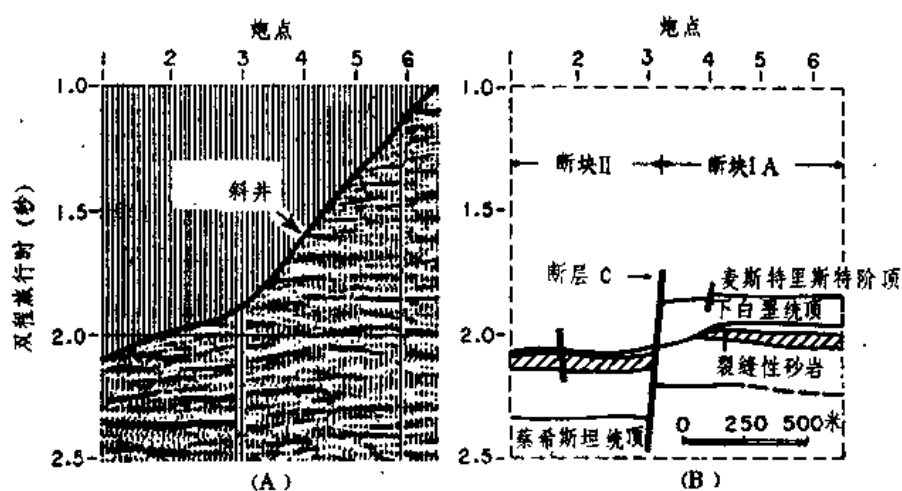


图 80 (A) P35井 VSP 上行波记录 (经反褶积排除了多次波) (B) VSP 数据取得的构造图

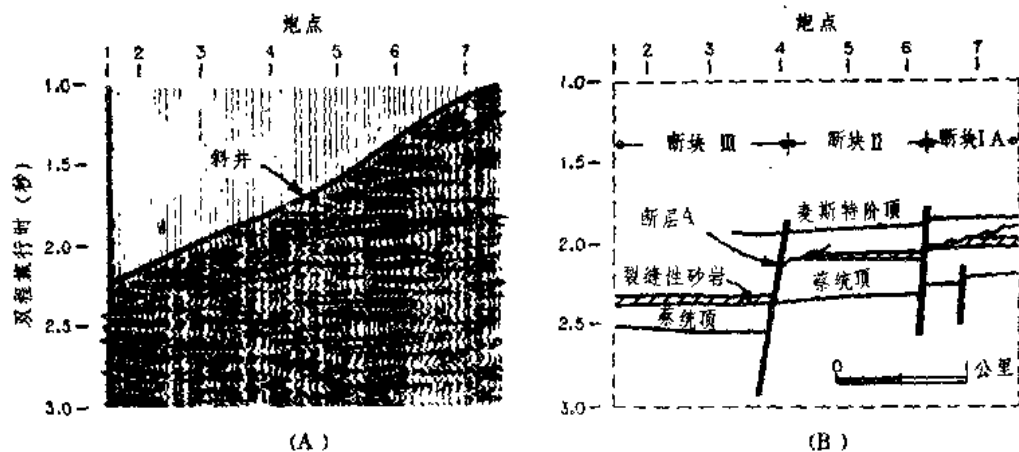


图 81 (A) P38 井 VSP 剖面图
(B) 解释构造图

程度显著提高, 大大减弱了来自侧向的断面干扰 (见图82) (详见[68])。

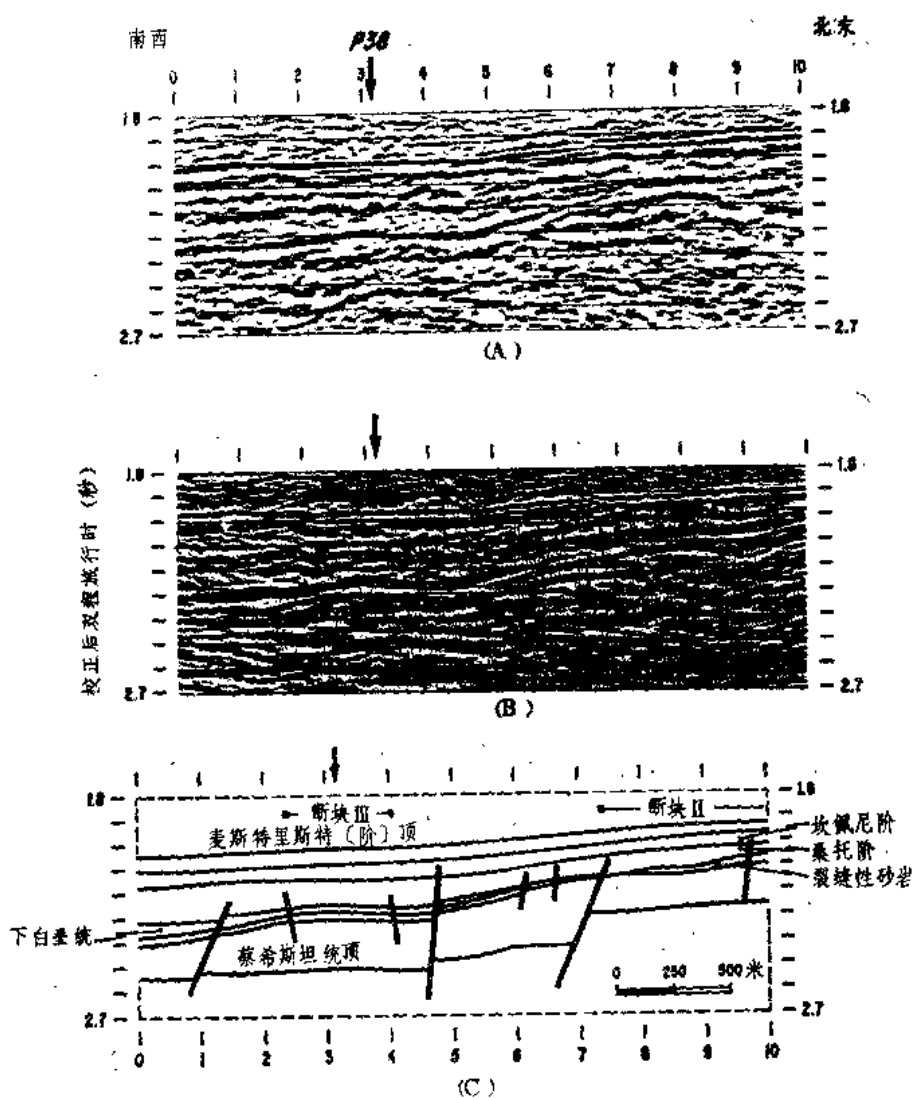


图 82 利用 VSP 资料重新处理 (反褶积、偏移) 后的高分辨率地震剖面图
(A) 原始地震剖面图 (B) 重新处理后的剖面图 (C) 解释构造图

结 语

根据上述资料,结合我国的现实情况,提出以下几点粗略建议,仅供参考。

1. 试用两种简易高频震源

目前国内所得地震信息频率偏低,与国外已有水平相较,大有发展余地。提高震源频率可视作提高分辨率关键性的第一步,因此建议:

(1) 在交通不便地区,可用浅井小炸药量(60—200克)爆破与小爆破迭加的方法加宽震源频谱。

(2) 在条件允许地段,可先用非线性可控震源作些试验。参考国外经验,扫描时间函数 $f(t) = 20 + 83.5\sqrt{t}$ ($t \approx 10$ 秒) 或 $f(t) = 14(1 + 2.172\sqrt{t})$ ($t = 8$ 秒) 皆可一试。

震源频带宽度的选择一般以保持信-噪比值不低于2为界。在信-噪比值过低(<2)的情况下,应首先以提高信-噪比值作为主攻方向,提高覆盖、迭加次数。

2. 观测系统中最好采用单检波点接收(或小距组合检波);适当提高时、空采样率($\Delta x \approx 10-15$ 米, $\Delta t \approx 1$ ms);采用真幅值、小失真记录;并专门布置浅层折射观测,以利静校正精度的提高(0.5—1ms)。

3. 开展垂直地震剖面法(如VSPCDP法与多偏移距法)的观测与试验,结合其它物探测井资料与地震剖面信息的对比分析,有利于寻找小断层、预测井底以下薄层,提高求速精度及波速谱的纵、横向分析研究。

4. 利用地震真值记录,可加强其动力学特性的分析研究;包括振幅与相位的纵、横向变化并逐步从时域进入频域,分析各点地震信息的频谱与积分能谱成分变化曲线图,有利分辨。

5. 分析处理过程要求与地质解释、模型试验密切配合,循环迭代,由粗至精,不断修正。还要充分利用各类测井资料和计算机人机联作、多种显示的优越性,有利参量的迅速选择修改。

6. 生产部门可与科研单位、学院相结合继续开展某些初显效益的高分辨率新技术方法的研究与应用(如最大熵频谱及多种反褶积处理法、波速岩性转换分析,反演伪声波阻抗曲线图及有针对性的正演模型实验等),有利解决生产难题。

主要参考文献

- [1] 钱奕中: 靠先进技术与科学管理不断开拓勘探新领域(物探情报 1984.2)
- [2] 钱奕中等: 松辽盆地北部齐家-古龙地震低速带研究(物探情报 1984.1)
- [3] 钱奕中、玉燮培: 松辽盆地北部小林克-哈拉海断裂带、泰康、三肇地区三小构造研究(1984.12)
- [4] 黄绪德: 地震资料处理的新发展(石油物探 1985.3)
- [5] 吕牛顿: 薄层的作用—谐波响应及简化模型合成记录(石油部石油勘探开发科学研究院地质所 1982.5)
- [6] 钱绍新: 最大熵原理在地震资料处理中的应用(石油地球物理勘探 1984.4)

- [7] 俞寿朋等:地震勘探法中的分辨率与信-噪比(1985年中国石油学会与地球物理勘探学会联合会议文集)
- [8] 牟永光:地震勘探资料数据处理方法(第七章)
- [9] 刘雯林:地震记录的分辨率(石油地球物理勘探 1980, 第五期)
- [10] 张淑敏:高分辨率地震勘探(国外地球物理勘探新技术 1980.11)
- [11] 李承楚:最大熵反褶积初探(1974.4)
- [12] 赵伯芳等:处理高分辨率的一种方法(石油物探 1982.3)
- [13] 芦宗莱:高分辨率地震勘探综述(物探技术 1985.8 专辑)
- [14] 牛毓荃:反褶积技术评述(石油部物探局研究院 1983.6)
- [15] 陈俊生:偏移技术分析(石油部物探局研究院 1983.7)
- [16] 高分辨率地震勘探联试小组:山东省 JN 煤田高分辨地震勘探试验(1982.4)
- [17] A.J Berkhout:高分辨技术(Proceedings of the 11th World Petroleum Congress vol.2, 1983)
- [18] N.de-Voogd:薄层响应与频谱宽度(Geophysics Vol.48, No1, 1983)
- [19] R.Tatalovic:分辨薄砂层以评价油藏(SEG 54th, S11.8, 1984)
- [20] Guy W.Purnell:薄层的采集问题(5th Semiannual Progress Review, Univ.of Houston vol.9, 1982)
- [21] David A.Fisher:薄层与界面反射的物理与数字模型化(SEG 54th, S11.7)
- [22] J.A.Mc Donald:薄楔的地震分辨(6th Semiannual Progress Review, Univ. of Houston Vol. 11, 1983)
- [23] S. S. Lee:一种薄楔的合成地震图研究(同上)
- [24] R. Tatalovic等:用地震法分辨薄楔的进一步研究(同上, 唯Vol. 12)
- [25] J. K. Costain:利用积分能谱来识别薄层
(Geophysics Vol. 50, No3, 1985)
- [26] Г. В. Демуря:在物探资料处理中波谱分析的新展望
(Прикладная Геофизика Вып. 97, 1980)
- [27] F. K.Levin:薄层引起的波速异常
(Geophysical Prospecting Vol. 32, No2, 1984)
- [28] S. H. Bickel:薄层速度分辨率
(Oil & Gas Journal Vol. 83 No. 14, 1985)
- [29] B. B. Tal. Virsky 等:井底以下声波阻抗的高精度预测(Geophysical Prospecting Vol. 31, No.2, 1983.译文见:物探情报 1984.1)
- [30] A. M. Darling:增强测井与地震数据分辨率
(Geophysical Prospecting Vol. 32, No.4, 1984)
- [31] Е. В. Карус:详查地质剖面的高分辨率地震勘探法(Советская Геология 1983, 第10期)
- [32] W. L. Chapman:可控震源系统—高频勘探工具(Geophysics Vol. 46, No.12, 1981)
- [33] H. Mayen:非线性扫描(译文见:石油地球物理勘探 1984, 4)
- [34] Paul. Chelminski:陆地空气枪(中美物探学术交流会议文集 1985, 38.1)

- [35] 美、加拿大专家组1984.3—4月“对中国物探工作的咨询意见”
- [36] 石油部“三维地震技术交流会”资料 (1984)
- [37] L. R. 德纳姆等: 什么是水平分辨率?
(译文见: 石油勘探译丛1981, 6)
- [38] N. A. Anstey: 分辨率和带宽
(SEG 50th, 译文见: 油气勘探译丛, 1983.1)
- [39] Christrne E. Krohn: 检波器与地的偶合
(Geophysics Vol. 49, No.6, 1984)
- [40] Edelmann: 横波源: 用正交于偏振波的振动产生横波 (Geophysical Prospecting Vol. 29, No.4, 1981)
- [41] SSC (美地震服务公司) 工作报告—1012: 射线转向控制 (Oil & Gas Journal Vol. 82 No. 32 P. 78广告)
- [42] S. H. Bickel: 维纳滤波的分辨率功能
(Geophysics Vol. 48, No7, 1983)
- [43] S. Norman Domenico: 横波勘探论文集
- [44] A. H. Balch: 垂直地震剖面法选文集 (参考其第八章、第六章)
- [45] C. J. Wade: 在薄砂层与页岩内不定形砂体的成象 (SEG54th, S11.6)
- [46] J. Fertig: 点源爆破产生横波: 以地表作为 P-S 转换波发生器 (Geophysical Prosp. Vol. 32 No. 1)
- [47] D. Freed: 使用光导纤维遥传系统作三维探测 (SEG 53th, S 21.4)
- [48] Г. В. Матвеевко: 地震数据的偏移迭加处理 Разведочная Геофизика 1984 Вып. 2)
- [49] Н. Г. Давыдов: 籍计算机处理来提高 Кокпансорская盆地МОГТ法的分辨能力
(Нефтегазовая геология и геофизика 1983 вып.11)
- [50] Brian Russell: 地震反演用的最佳可控震源记录 (52thSEG S5.7)
- [51] W. R. Calcote等: 奥斯汀白垩层的三维地震勘探 (52th SEG S 5,8)
- [52] Richard R. Vincelette: 新墨西哥圣胡安盆地砂石中油藏的勘探 (AAPG Bulletin Vol. 65/11 1981)
- [53] А. И. Анохин: 利用 MOB-МОГТ资料探查并跟踪顿巴斯北界的小幅断层
(Разведочная Геофизика 97)
- [54] И. К. Кондрамьев等: 应用最大熵法滤波提高可控震源数据的分辨率
(Разведочная Геофизика 1984 Вып.2)
- [55] Harry R. Espey等: 作为噪声、频谱与反射极性函数的分辨率极限
(SEG 53th S24.1)
- [56] Omnes. G.: 垂直地震剖面法取得的 P 波与 S 波测井资料 (Petroleum Techniques V. 32, 1980)
- [57] BOB A. Hardage: 垂直地震剖面法
- [58] Barry Burt Les Denham: 在居民汇集地区实现大规模大陆三维勘测——东得克萨斯真史 (Oil & Gas Journal Vol. 83 No 40, 1985)
- [59] M. H. Safar: 克希荷夫偏移所取得的横向分辨率 (Geophysics Vol. 50 No.7,

1985)

- [60] A. Chaperon: 利用可控震源的非线性扫描产生高频数据 (53th SEG, S5.7)
- [61] Norman E. Pullin: 八十年代的高分辨率爆炸震源 (53th SEG, S 1.8)
- [62] Klaassen K. B.: 一种新型高分辨率检波器 (EAEG 年会报告 1982)
- [63] A. Ziolkowski* and W. E. Lerwill**: 高分辨率地震剖面法找煤层的简易途径
(国家煤矿委员会*与地震服务公司** (英) 合著)
- [64] R. Tatalovic: 子波整形反褶积 (9th Semi-Annual Progress Review, Uni. of Houston Vol. 14, 1984.12)
- [65] Roger M: 利用地震反射特性分析识别一个薄地层圈闭 (55th SEG, AAPG7)
- [66] Julie A. Gaynor: Williston盆地东翼 Mission峡谷的地震地层学分析 (55th SEG, S 4.4)
- [67] Carol Monash: 通过有偏移距的 VSP 法确定纽约州 Chautaugua 某沿巴斯岛孤带的断层位置 (54th SEG, VSP3)
- [68] Roger Johnson: Piper油田内垂直地震剖面法的应用 (JPT 1984.9)
- [69] S. H. Bickel: 平面波 Q 反褶积 (Geophysics Vol. 50, No9, 1985)
- [70] W. Keith Hirsche: 以模型为基础的 Q 补偿 (54th SEG, S 18.7)

