

油气勘探专题资料之二

26314



200353973



00299510

垂直地震剖面

《油气勘探译丛》编辑部编

5245 / 5



石油工业部科学技术情报研究所

一九八四年九月

垂直地震剖面在地震勘探中的应用

A. H. Balch et al.

黄汉明、高书良 译

牛毓荃 校

摘 要

八年来, 美国地质调查所对垂直地震剖面在地震勘探中的应用进行了广泛的研究。使用的震源有地面空气枪、可控震源、炸药、海洋气枪以及井下气枪。炮点偏移的范围是100英尺到7800英尺, 井深则从1200英尺到超过10000英尺。

垂直地震剖面法可以按三种特定方式应用于地震勘探。

第一, 用于逐级追踪地面观测到的地震波直到它们在地下的出发点。从而可以非常有把握地把地面地震剖面与测井记录连接起来。

第二, 用于证实目的层, 如高孔隙率层的可探测性。在做地面地震剖面前或以后, 用来确定已知层位或层序是否能产生在地面可检测出的反射。还可用来观测反射波的振幅和特征。

第三, 用于测定地层层序的声学特性, 有时还可把这些声学特性与主要的勘探参数关联起来, 如确定视衰减与含砂百分比的关系。

通过对地震脉冲演变的研究, 对虚反射和多次波的研究, 以及对地震道反演技术的研究, 垂直地震剖面用来间接辅助地面地震勘探是大有前途的。

常规的地震数据处理技术, 几乎都适用于垂直地震剖面的数据处理。例如, 正常时差校正(动校正)、叠加、单道和多道滤波、反褶积以及子波整形等处理技术。

1. 引言

美国地质调查所(USGS)对新的垂直地震剖面野外技术及其在勘探中的应用的研究, 已历时八年。在井中的不同深度测点上记录地震波信息, 这个基本概念早就有人提出过。

近来开始出现了一系列新的有关垂直地震剖面法的英语文献。正像人们所期望的那样, 这些文章进一步展示了垂直地震剖面法的发展潜力。地震勘探其他领域中取得的新进展已可能使这种潜力成为现实。最新文章表明, 计算机处理也取得了明显效果。

研究过程中, 我们总共做了19条垂直地震剖面。其中, 一些剖面与最近文献中讨论的相类似, 另一些则在野外技术应用上、在处理和解释上完全不同。我们在野外使用了包括炸药、地面空气枪、井中空气枪和可控震源(单个震源或震源组合)等各种震源。检波器下井使用了机电和弹簧驱动两种推靠装置, 有时使用三分量井下检波器。一般深井测点布置很密(约15英尺), 并采用数字记录。密集的数据间隔使我们有可能进行广泛的计算机处理, 在其他情况下这是困难的或不可能的。

在此, 我们将利用垂直地震剖面的经验和成果介绍如下:

2. USGS的垂直地震剖面法简述

(1) 理想而现实的野外观测系统

图1a是理想化的典型垂直地震剖面法观测系统。震源设在地面或靠近地面处。一组地震检波器(R)固定在井中。下行直达波和上行反射波在各个测点上依次被记录下来。一般检波器间隔为10—15英尺。由于是理想的纵波震源子波, 没有噪声, 只有一个简单的水平反射面, 所以很容易从地震记录上辨认出直达波和一个单独的反射波, 并根据到达时间把它们鉴别出来(图1b)。反射波的深度及其特征和波形都容易确定。然而, 实际情况永不会这样理想。

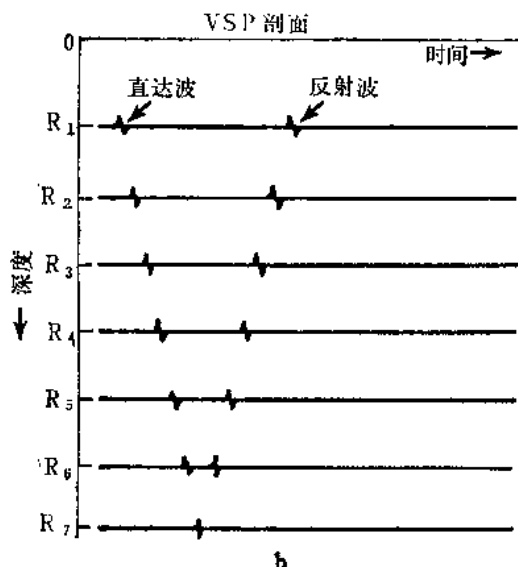
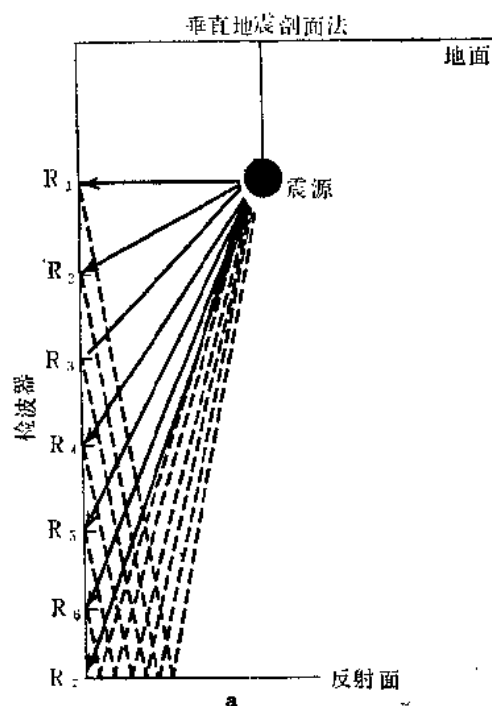


图 1(a) VSP野外观测系统简图
(b) 由图(a)的观测系统得到的理想化的VSP记录

当前, 受技术条件限制, 只能用一个检波器下井, 一次只能在一个测点上 进行记录。同时我们的设备也只限于测量运动或速度的垂直分量。

(2) 检波器和记录系统

井下检波器的固定需要有电动机械或电动液压推靠装置。一般, 这种工具设有一个制动臂, 由受地面控制的电机驱动。用这种推靠装置, 可以有一个相当大的力驱动制动臂使其紧靠井壁。当制动臂一靠紧井壁时, 就产生浪涌电流, 给出一个正向指示, 表明制动臂已靠紧。然后把电缆 放松 5—10 英尺, 以抑制沿紧绷的电缆向下传播的噪声。

其他可选择的下井工具有弹簧驱动制动臂、压敏检波器和三分量检波器。随便哪一种都可用, 但都要与别的必要的工具性能进行折衷考虑或平衡。例如, 使用三分量检波器不能用电动制动臂, 而弹簧制动臂在有套管的井中使用时, 不能防止检波器的滑动或蠕动。

所有资料都采用了数字记录, 并进行了解释工作所必要的大量的数字处理。在与地面地震勘探有关的工作中, 为了使两者资料类型一致, 最好使用与地面地震勘探尽可能一致的记录系统。

(3) 震源

到目前为止, 在垂直地震剖面的研究中, 以使用地面气枪的效果最好。使用炸药震

源,一般信号频率较高,频带较宽,并可得到较高的输出振幅。但存在两个相互联系的问题:震源波形不易重复,野外施工非常复杂。那是由于需要逐个地在几百个不同测点上记录。就是一个测点激发一次,也需要几百次爆炸。为了保持震源波形近似一致,以及在一口井中激发次数尽可能多,我们采用了比较小的药量(1—2磅左右)。即使这样,每测一口井还需要40口炮井。这就要进行昂贵费时的钻炮井工作。另外,炮井塌陷常常妨碍在一口井的同一测点上重复激发,造成震源波形变化。用小药量时,从井中提取炮线困难,使问题进一步复杂化。施工过程中,迅速用水填满炮井,也是不容易的。在不同的井中放炮,震源波形变化更大。仅就整理炮线来说,也是很麻烦和浪费时间的,例如,若激发深度选用100英尺,放400炮,则需要提取炮线40000英尺。

为加快施工,我们曾试用两口或三口炮井交替放炮。这种方法不符合安全要求,很危险。因为几个炮线头同时放在地上,容易弄错放炮次序。由于使用炸药震源存在以上及其他问题,最后我们几乎用地面空气枪作为唯一的手段。

地面气枪,如Bolt LLS-3型,避免了上面提到的使用炸药震源的大部分问题。不需要炮井,几乎可以在一固定点无限次地激发。对于振幅弱的问题,可用在同一测点重复激发(可多达20次),然后用人工合成的办法来补偿。考虑到地面气枪的方便条件,虽固有频带较窄,还是可取的。炸药震源产生的高频成分,大部分在地下迅速衰减掉。地面气枪信号缺少高频的现象,在深处的记录中远不象最初猜想的那样明显。

使用地面气枪震源的两个主要问题是:在很冷的(零下)气候条件下的可靠激发问题和多枪组合同步问题。我们发现,保证冷天正常工作的最基本因素是要有熟练的、有经验的操作员。多枪同步,可由多道监测示波器来完成。用示波器连续观测震源加速器的脉冲,反复调整激发延迟时间,以保证多枪同时激发。

3.关于垂直地震剖面法的一些问题 和可能解决办法的评论

(1)震源波形变化

如前所述,我们应该在理想情况下激发一次,同时在井中所有测点上记录。但受设备条件限制,一次只能在一个测点上记录。从原理上讲,多次激发震源并在需要的测点上一次一个测点地进行记录时,可以得到等效的数据组。但仅当震源波形保持一致时,两组数据才确实是等效的。而实际上,这是少有的情况,特别在使用炸药震源时。

图2是这种情况的一个例子。用埋在震源下100英尺处的检波器监测震源波形,其中几个波形画在该图的左侧。

用小药量,激发深度不变并填满水,可以大大减小波形变化。温歇尔(Wuenschel, 1976)介绍过一种很精巧的,保持震源波形不变的野外方法。

任何炸药震源波形,很少能够重复产生10或12次以上。震源波形变化给资料处理和以后的解释工作带来很大困难。例如,一种增强有效波的有效处理技术是速度滤波。在用于多道速度滤波设计的多道处理模型中,我们假设一组相邻记录道上的有效波波形相同(只是到达时间不同)。如果逐个测点的震源波形都在改变,这一条件就不成立,速度滤波后的

资料质量将变坏。在解释时，各测点的波形可能不同，但我们不能由此对介质的物理性质作任何推断，除非我们已知这些变化不只是由于震源波形改变引起的。

为补偿震源波形变化，可以设计子波整形滤波器，同时可以任意地选择在监测示波器上测量出的一个震源波形作为标准子波。然后对每一测点的每一炮都设计一个整形滤波器，它们可以把监测示波器观测到的波形转换为标准子波。可把这种滤波器用于相应的井中记录。照这样获得一套新的VSP数据资料，它接近于震源波形不变情况下的野外记录。

图2的中间部分是一些典型的整形滤波器，它适应于左侧监测示波器记录的波形。图的右边，是整形滤波器与监测器记录下来的震源波形相褶积的结果。

即使用地面气枪震源，波形也可能变化。当气枪反复激发时，震源下面的土壤逐渐被压实，引起震源波形“漂移”。气枪多次激发以后，炮点位置往往变得不能再用，必须改变炮点位置，这几乎也总是引起震源波形变化。图3就是这样的一个例子，该例取自怀俄明州P-F1号井。从下往上数第八道对应于改变的激发位置。它引起的初至变化是很明显的。

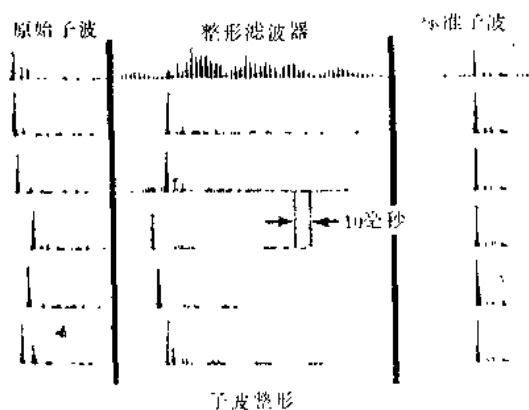


图2 左侧：Coronado Collins W-1井震源监测器波形
中间：用褶积变换震源波形的整形滤波器
右侧：震源波形与相应的整形滤波器相褶积的结果

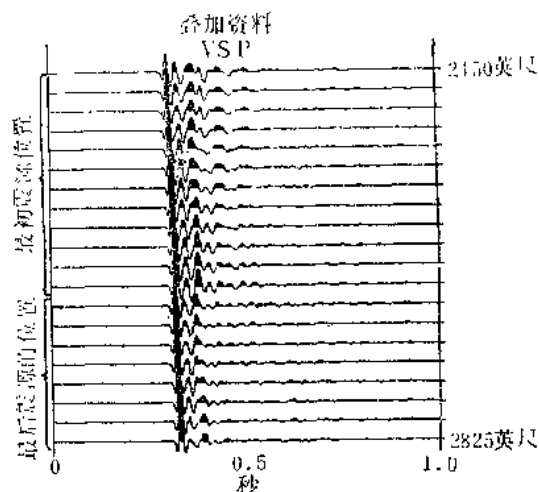


图3 初步整理的P-F1井复合VSP记录。
可以看出气枪易位引起初至波形变化

(2) 井筒干扰波

我们定义井筒干扰波为局限于井眼附近的一种地震扰动。可以认为最强的一类井筒干扰波是通过液柱传播的纵波。另一类型是沿套管向下传播的（套管波至）。还有一种局限于井孔与围岩的分界面上。也可能还有其他的类型。井筒波几乎不含岩性信息并能严重干扰有效的体波记录。由于它们局限在井眼中，很少几何扩散，所以在很深的地方它们的振幅相对于体波来说，可能非常大。

图4是一个VSP的例子。图中井筒波列（箭头所指）的振幅比下行震源脉冲大5—10倍。虽然这是一种极端的情况，但并不罕见。

减小井筒波干扰最有效的方法是震源远离井口。根据我们的经验，大多数井筒波的扰动在地表附近进入井中的方式，不是来自震源的直达波，就是在某些情况下来自浅层折射。由于这种能量是沿水平方向或近似水平方向传播到达井眼，所以可采用压制水平传播

能量的震源组合进一步压制井筒波干扰。另外，速度滤波也常常可以用来压制这种干扰。在一些情况下，井筒波幅度非常大，以致采用了一切消除它的方法后仍然存在。所以VSP的最终分辨力可能受到井筒波的控制。

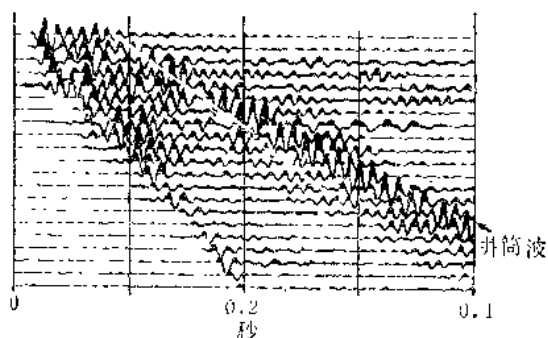


图 4 Coronado Collins W-1井VSP原始资料，展示出高振幅井筒波列的存在

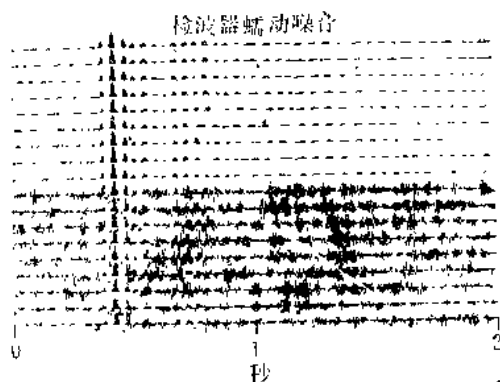


图 5 USGS水文试验1井VSP原始资料。下面几道出现蠕动噪声，上面的几道是在检波器稳定推靠良好时记录的

(3) 井下检波器的蠕动

把检波器固定到井中以后，总希望放松电缆以减少电缆波的干扰。在某些情况下，检波器的重量加上部分电缆的重量造成微小滑动，检波器可能沿井眼逐渐向下蠕动。虽然检波器蠕动不限于有套管的井段，但这种现象在有套管的井中特别讨厌。图5是井下记录上有检波器蠕动影响的例子。下面几道呈现出显著的检波器蠕动的影晌，而上面几道是在检波器推靠稳定的情况下记录的。

遇有蠕动噪声时，最好是在现场消除噪声，而不记录它。更换或彻底检修推靠系统可能是必要的，但提升检波器要花费相当的代价。如果检波器在套管井中蠕动，则有可能使其静止在套管接头处。这时，套管接合点的间隔决定着空间采样间隔。这种间隔可能大得不能接受，而且通常不是常数，因为单根套管长度可有很大差别。归根到底，我们可能被迫在蠕动噪声存在时进行记录，然后通过复合（叠加）及频率滤波处理来压制它。

(4) 弱信号问题

如前所述，地面空气枪与炸药震源比较，不利条件之一是它的信号幅度低。在很深的部位，这个问题特别令人烦恼。因为在那儿几何扩散、吸收、衰减以及其他传播影响显著地削弱信号幅度。

可用叠加和多个地面震源组合来提高震源信号强度。假如所用震源能严格同步，则信噪比（S/N）与组合的震源数成正比，而使用复合或叠加处理时，则仅与震源数的平方根成比例。

为提高VSP工作的信噪比（S/N），我们同时使用上述两种方法：用3个同步震源构成一个标准组合图形。每一个深度激发10次。

(5) 表层混响和虚反射

在地震反射解释中，经常做一种不言而喻的假设，即震源激发一种单个的短脉冲。实际上，这是少有的情况。图6取自Collins的井的VSP资料，它说明了这一点。该图下行

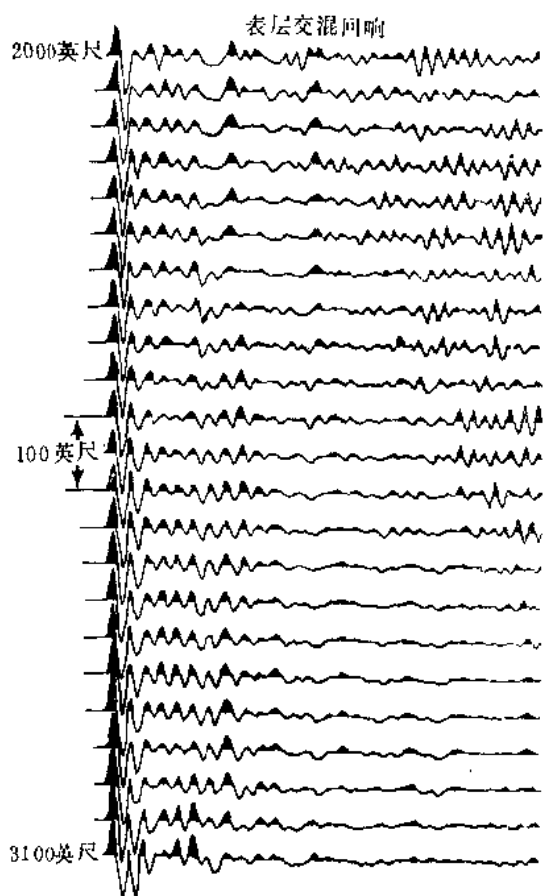


图 6 Collins W-1井VSP资料中的部分初至波记录。对下行波做了时移校正。初至波后面的长“尾巴”，可能是表层混响的影响

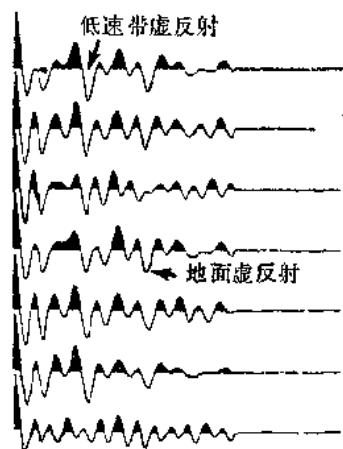


图 7 图 6 资料的自相关结果

波已经过时移校正排齐了。

所有测点上的最大振幅波都来自震源的初至，这本是预料之中的。然而初至后面拖了一个长“尾巴”，当然就不能认为是短脉冲。在初至之后，有一个第二次地震能量猝发和附加的第三个波至。图 7 是选自图 6 的几个道的自相关曲线，证实了续至波的存在。标有“低速带虚反射”和“地面虚反射”的持续不断的自相关曲线的波谷，对应于图 6 的续至波。

我们用子波整形，至少可部分地补偿这种影响。其方法与以前在震源子波校正中叙述过的方法相类似。如果得不到直接的震源脉冲资料，可根据井下资料的自相关结果用统计法估计震源脉冲的特征。

(6) 被高振幅下行波和干扰掩蔽的反射波

速度滤波是垂直地震剖面法中必不可少的组成部分，在此对这项技术做一简要叙述。图 1-6 中几乎看不到上行（反射）波。反射是存在的，但与下行波相比振幅太小。由于它们的振幅小，所以在高振幅下行波和无规则干扰存在时，很难或不可能看出来。

图 8 是 USGS HTH-2 井 VSP 资料，已做过仅让负视速度的上行波通过的速度滤波处理，对各道依次作了时移，使这些地震同

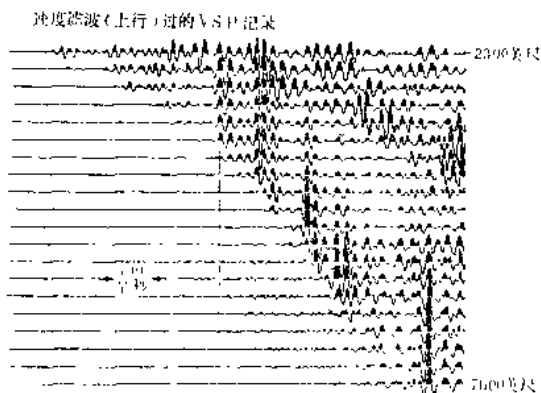


图 8 USGS HTH-2井VSP资料，速度滤波增强了上行波振幅，并做了时移校正，使同相轴对齐

相轴在垂直方向排齐了。

处理后,相干的反射(上行波)明显了。还可根据图右边的深度标尺确定反射源点范围。

4. 数字垂直地震剖面记录的计算机处理(提要)

几乎所有适用于地面地震的面向计算机的数据增强和解释技术,在垂直地震剖面资料处理中都是有用的。然而,由于原始资料有本质的不同,这些处理技术需要作某些改动。典型的资料处理顺序概括如下:

- (1) 解编。
- (2) 初步整理,分类,静校正,动校正,振幅均衡和调整。
- (3) 叠加。
- (4) 设计和应用子波整形滤波器。
- (5) 多道速度滤波。
- (6) (如果需要的话)作增益校正。
- (7) 上行波累积叠加(如果想和地面地震资料很好连接的话)。
- (8) 合并上行波和下行波(通常上行波要进行振幅放大)。
- (9) 估算目的层传输函数。
- (10) 如果想用VSP产生目的层的波阻抗曲线,要进行反滤波(即“道反演”)。

5. 垂直地震剖面在地震勘探中的应用

(1) 识别地面地震剖面上的反射波

图9是美国怀俄明州PF-1井一条处理过的垂直地震剖面。图10是蒙大拿州M-1井的一条类似的垂直地震剖面。垂直深度刻度线左边绘有部分声波测井曲线和岩性录井图。常规地震剖面段横放在垂直地震剖面的上方。两图的地面地震剖面段几乎都穿过井口。

如果在地面地震剖面上选择一个主要的同相轴,如图10中所标的“Madison”组。我们可以在垂直地震剖面的顶部辨认出对应的那个同相轴。然后逐个测点向下追踪该波,一直追踪到它的原点区,它在6800英尺深度附近开始。该点与岩性录井图上Madison组的顶对应,因此对地面地震剖面上Madison组的识别是可靠的。也可以利用恰好在该测点下面速度测井曲线上明显的偏转来鉴定它。

我们很感兴趣的另一个同相轴是来自第一Leo层(图9上标有第一组Leo)的反射。这个反射波可从PF-1井约3200英尺深处的原点一直追踪到穿过该井的地面地震剖面。也可以利用类似方法识别地面地震剖面上的其他波。

虽然还有别的方法可用来识别地面地震剖面上的波(例如利用合成地震记录,它是建立在简化地层模型的理论响应基础上的),但我们确信,实际观测地层中形成的真实的地震波,能使我们对这些波辨认的可靠程度高得多。

图11表示另一种类型的地面—地下剖面连接方式。将穿过M-1井的地面地震剖面段从中间分开,插入图10中垂直地震剖面顶部的一簇地震道。由不同的地震队,使用不同仪

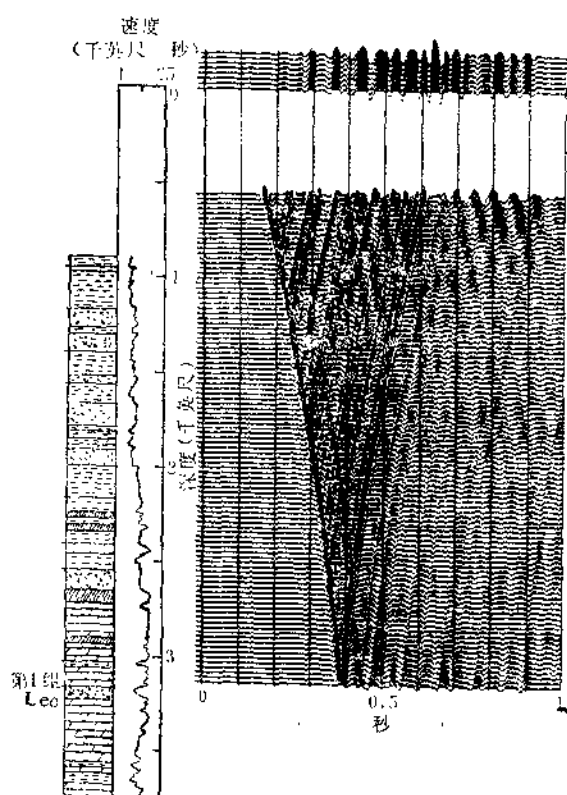


图 9 处理后的PF-1井 VSP资料显示出岩性录井与地面地震剖面的连接。VSP资料经过初步整理、复合、子波整形,又分别做了增强上、下行波的速度滤波处理,然后提高上行波增益,合并上行波和下行波

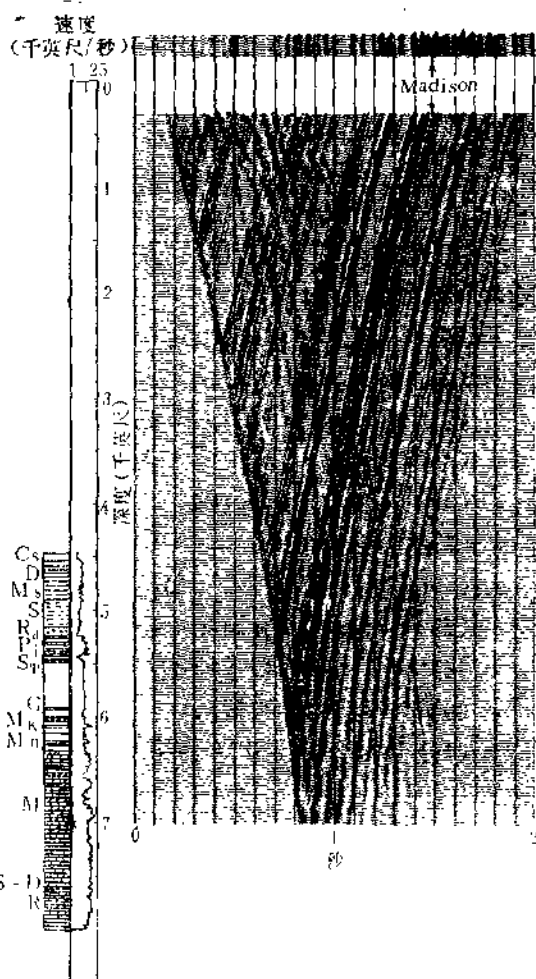


图 10 处理后的M-1井VSP资料说明岩性录井与地面地震剖面的连接。VSP资料处理顺序与图9类似

器和震源,相隔6个月的时间取得的两组不同的实际地震资料相符得很好。

(2) 分析地面地震勘探问题

能源部内华达试验场是一个主要的核武器试验场地。在选择地下核爆炸场地时,古生代基底面(Tonopah层)的深度以及基底的局部构造形态是两个必不可少的参数。

想用地面地震资料制作基底面的构造图,效果不好。因为很厚的、具有相当吸收衰减能力的疏松冲积盖层通常造成反射资料缺乏。其他勘探人员已弄清古生代基底面是侵蚀面。因此可能是个不规则的面。这种侵蚀面通常是相干的、可见地震能量很差的反射面。

1978年9月,在试验场U-10-bd场地进行了一系列垂直地震剖面的研究(Balch, et al. 1980)。图12是其中一条处理过的垂直地震剖面。该资料已做过增强上行波的速度滤波处理。

立刻可看出剖面上有两个特征:第一,各道上都出现初至波(震源脉冲),这一脉冲

非常强，以至尽管多道速度滤波使下行波受到很大的衰减，而初至波仍然存在。第二，图12下部510毫秒左右出现古生代基底强反射。显然，在研究过垂直地震剖面法资料的内容

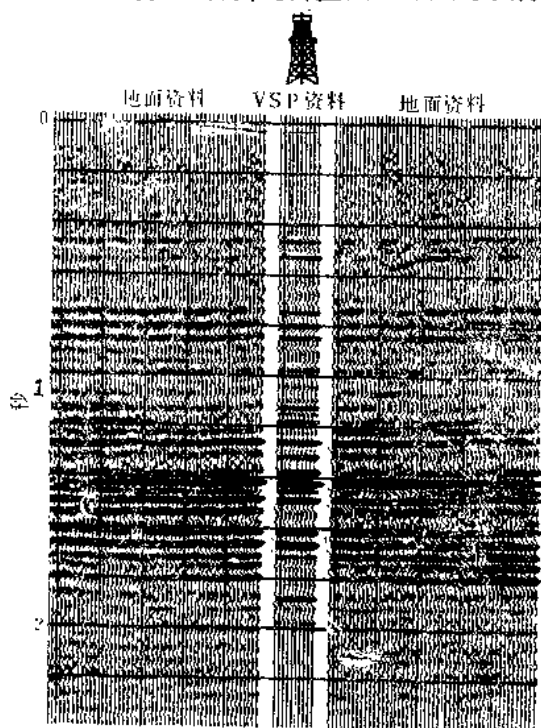


图 11 垂直地震剖面与地面地震剖面的另一种连结方式，地面地震剖面中间插入部分垂直地震剖面进行对比

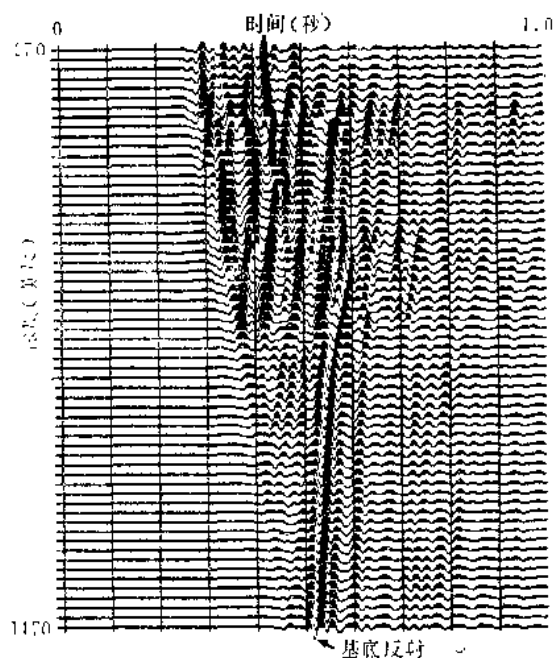


图 12 处理过的内华达试验场UE-10-bd井VSP资料。最下面一道上0.5秒的高振幅相干波是古生代基底的反射

后，以前对古生代不存在反射的各种解释是站不住脚的。

如果我们由下向上追踪图12中的基底反射波，则会发现在离地面一半深度的地方，由于其他同相轴的干扰，基底反射变得模糊不清。最后完全消失。对这种现象我们假想的解释是：在井附近，古生代基底的顶部是块断的。该处块状断裂发育。图中所示的古生代反射，大概是断层面的反射。在断层的上部，基底反射变得很弱，然后消失。我们无法构组由震源出发、经断裂的古生代层位反射，并到达U-10-bd井附近地面的射线路径，断面的几何形态不允许这样做。只有检波器在井的深部时才能形成这样的射线路径。

对这些资料的另一种处理结果表明：剖面上部500英尺段内存在明显的混响效应。封闭在地面与冲积层底界之间的强混响能量，会使显示出来的古生代地层的弱反射被完全遮蔽。

为证实这些解释结果，必需另作一些野外研究。这些研究尚未完成，我们的结论仍只是一种假设。但是研究结果证明了垂直地震剖面在分析和解决实际野外地震难题，即取得内华达试验场古生代基底反射中的重要意义。

(3) 配合地震地层勘探

垂直地震剖面在找油或找水的地层勘探中是一种有用的工具。一般地层含油层系涉及一个或多个层位。垂直地震剖面可用来测量多孔含油和致密不含油这两种状态下的标准层的地震响应。如果能够确定这两种极端情况下的地震响应的差异，那么，利用这种差别，

根据地震反射波检测多孔的含油目的层是可能的。我们将展示由可鉴别这种极端情况的VSP资料获得的三种类型的地震响应，它们是：与频率有关的衰减；地震脉冲响应的“特征”；地震脉冲响应振幅。

图13是美国怀俄明州Powder河盆地东部Minnelusa组的两个衰减测量结果。该区Minnelusa组内的Leo砂岩体往往含有工业油流。我们假设衰减与频率成正比。当透射波与入射波的频谱比按对数比例尺绘成曲线时，包络线的斜率近似等于比例因子。图13a中，在所测层段内Minnelusa组的含砂量约为6%。观测到的衰减比例因子小于 10^{-6} 奈培-秒/英尺（1奈培=8.686分贝）。图13b是一条类似的曲线，Minnelusa段含砂量约为70%，观测到的衰减因子近似为 5.8×10^{-6} 奈培-秒/英尺。这样我们就可以认为，在寻找Minnelusa组里的（Leo）砂岩体时，衰减可能是一种需测量的、有用的岩石特性。对这类衰减测量，黑格（Hague, 1981）和斯潘塞等（Spencer et al. 1982）曾作过详细的讨论。

我们用垂直地震剖面资料能够观测进入一层顶部的下行（输入）地震波列，也可观测该层产生的上行反射波列。利用这两种波列，可以计算该层的反射脉冲响应或传输函数。如果输入是一个短脉冲，我们认为这种计算结果就是它所产生的反射波列。通常要对这种脉冲响应进行零相位滤波，以便和该区地面地震记录的频带相符。

怀俄明州和蒙大拿州间的东Powder河盆地Madison红河层的反射，提供了一个实例：即反射特征如何帮助区分目的层位的多孔含油部分和致密不含油部分。该区红河层的孔隙中常含有丰富的地下水（每分钟1000加仑级），农业、煤矿和二次采油都很需要这种水。怀俄明州Big Horn盆地Madison组的孔隙中常含有富集的油气。

图14显示出了6道经过滤波的脉冲响应曲线。上面三道（a, b, c）是由致密的 不含油层导出的；下面三道（d, e, f）属于多孔产油层。尽管很难说出它们在量上的差别，

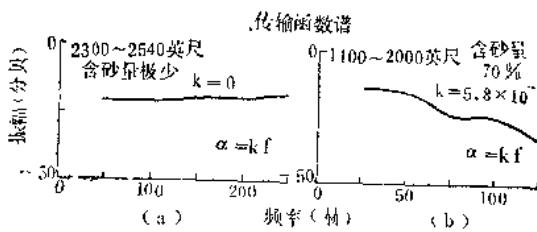


图 13 (a) 在Minnelusa组的几乎不含砂层的层段中传播的地震波的振幅谱曲线。从VSP资料导出。 α (奈培/英尺)——衰减系数； k (奈培-秒/英尺)——常数，是一种岩性特征； f ——频率， $\alpha = kf$ 。
(b) 地震波穿过含砂量70%的Minnelusa段时的同类曲线

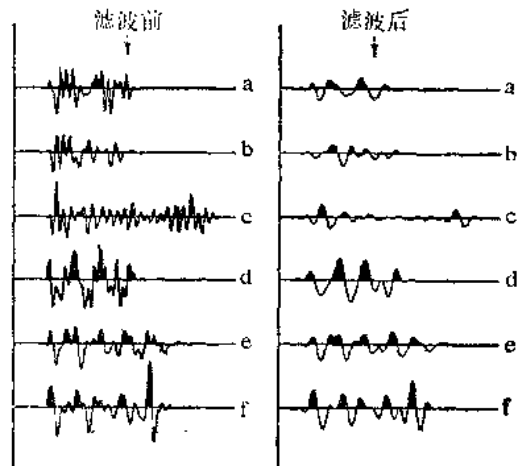


图 14 根据VSP资料计算出的，东Powder河盆地Madison组红河层的6条反射脉冲响应曲线。右边图形是左边图形经零相位带通滤波后取得的，滤波器的频带接近该区地面记录的标准频带。上面三条为致密层脉冲响应，下面三条为富含水层脉冲响应

但区分它们是容易的。在致密的不含油地层中,层间反射很少发生。由于大部分孔隙地层常局限在一些“带”中,层间反射是可预料的。这使人们联想起,地面地震剖面上多孔的Madison红河层内部有反射存在,而致密的地层就没有层间反射。

我们再看Leo砂岩的情况,作为我们曾经如何利用VSP资料配合地层地震研究的最后实例。

图15a是处理过的PF-1井VSP资料。该井由Minnelusa组中50英尺厚的Leo砂岩段产油。图15b是处理过的ETSI0-1井VSP资料,该井位于PF-1井南约10英里。在E0-1井中,Leo砂岩仅10英尺厚,不含油。两条VSP剖面均经振幅校准使较浅的Minnekahta反射具有单位振幅。可以看出,在PF-1井,相对于Minnekahta层来说,Leo砂岩反射具有大得多的振幅。这样我们可以认为,该区具有工业油流的Leo砂岩体,可根据振幅异常检测出来。我们确信,这种振幅异常的情况是肯定的。它是以实际观测到的反射波,而不是以合成记录为依据的,而且我们对震源振幅和激发条件进行了控制,可以排除近地表条件变化是这个振幅异常起源的可能性。这个振幅异常最近已由一条地面地震剖面加以证实(Balch et al., 1981)。

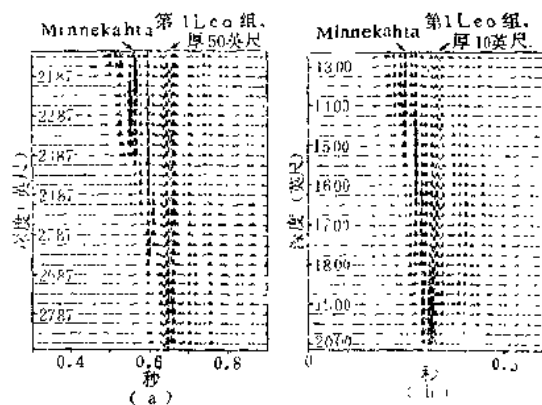


图 15 东Powder河盆地两口井的VSP资料中的第一Leo砂岩和Minnekahta层的反射。(a) 50英尺厚的Leo砂岩; (b) Leo砂岩厚10英尺或<10英尺。注意 (b)中Leo相对振幅的减小

6. 结 论

垂直地震剖面法已广泛用于各种反射地震勘探问题。我们引用的例子包括:地震地层学分析;分析地面地震勘探存在的问题;高度有把握地识别地面地震剖面上的各种波等,这并不是有关其现有或潜在应用的完整无余的一览表。肯尼特等(Kennett et al, 1980)和哈伯德(Hubbard, 1979)论述过VSP对海上地震资料反褶积、预测未钻穿地层的地质情况,以及其他方面的应用。加尔别林(Gal'perin, 1973)曾列举了VSP的13种应用。其中有些包括此处所举的非地层学的例子。加尔别林所提的很多应用中,要求使用三分量检波器和(或)大的震源偏移距,有两个变种这里没有考虑。加尔别林很少谈到数字垂直地震剖面记录的计算机处理问题。

预计,将会有更好的设备投入使用,更多的个人和组织将会活跃在这一领域。我们确信,在不久的将来,上列多数的应用以及在其他方面的应用将会得到广泛的采用。

(译自《Geophysics》1982, 47, No. 6, 906—918)

垂直地震剖面记录、处理、应用

F. Mons et al.

肖玲译

摘 要

采集和处理技术的进步使对井中地震波列的研究成为可能。

有了详细的采集程序和定量资料处理,人们就能得到地层传播特性、多次反射波以及地面地震所不能接收到的反射波(包括深层反射)等有用信息。

由测井曲线计算的合成垂直地震剖面可以将地面地震资料与测井资料精确地连结起来。

1. 引 言

垂直地震剖面(VSP)是一种高分辨率地震方法。由于井下传感器和轻便记录系统的改进,VSP的发展已成为可能。

垂直地震剖面可以在空间和时间两个领域内提供井眼附近地区的详细资料。

VSP主要用于研究声波传播与深度的关系、分析多次波并得到精确的地震记录。这些地震记录可用来标定地震剖面 and 分离真假反射。

合成垂直地震剖面是根据测井曲线计算的。由于它可以准确地计算出一次波和多次波的影响,所以它们有助于解释垂直地震剖面。

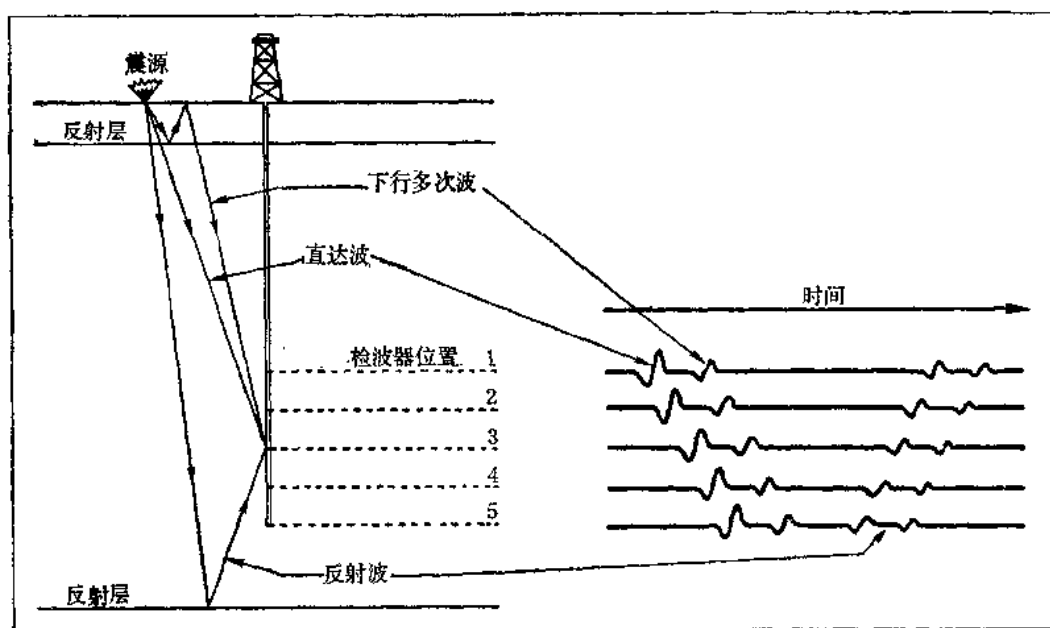


图 1 VSP是由上行波和下行波两个波列组成。在图上可以清楚地看到多次波

VSP 处理流程概图

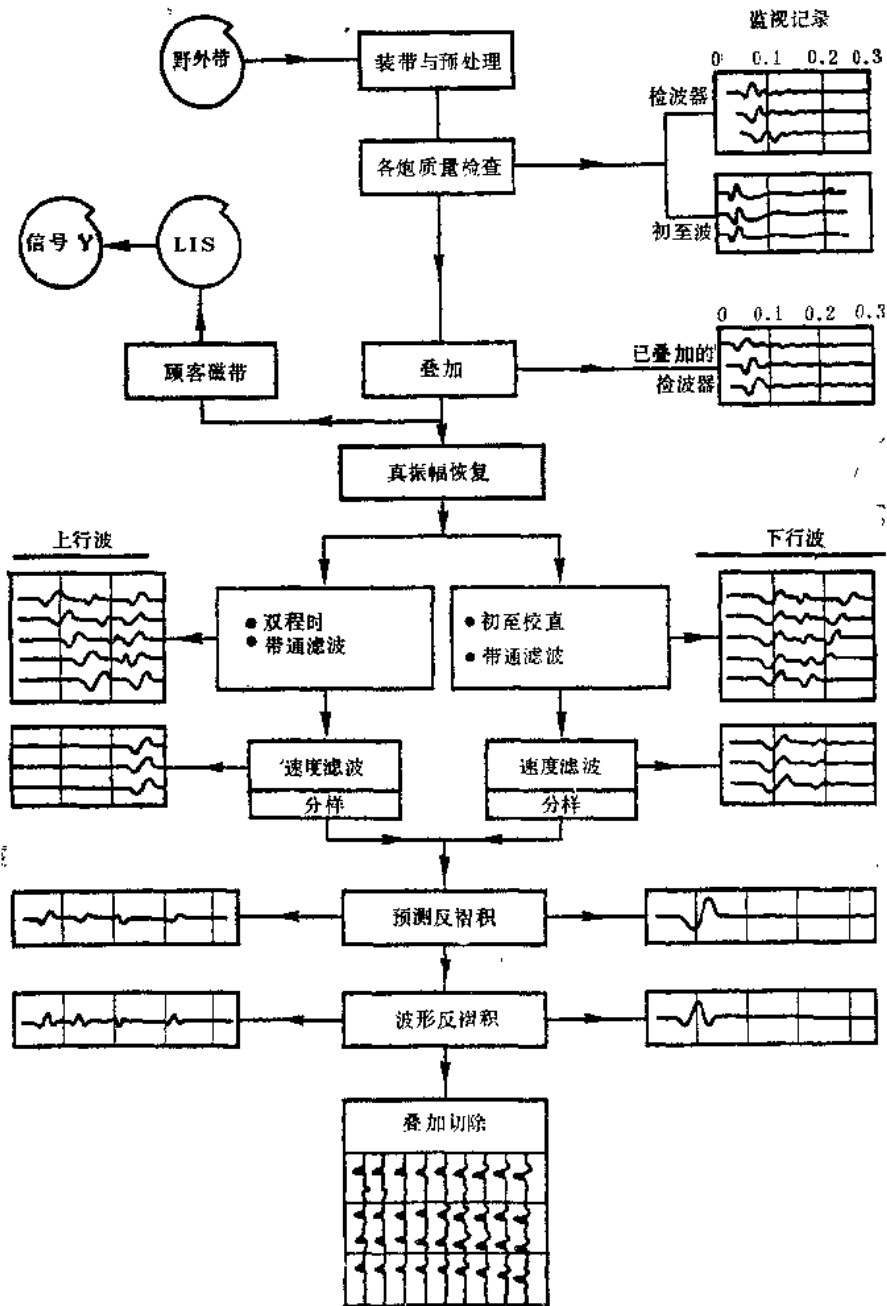


图 2 VSP 的处理由三个主要步骤组成：为使放炮质量最佳而作的数据编辑；上行波列和下行波列分离以及反褶积

同时解释合成地震记录(GEOGRAM斯伦贝谢注册商标)、实际VSP记录和合成的VSP记录可以使地球物理学家很好地了解地面地震资料与井中测井曲线的连结关系。

2. VSP方法的原理

VSP是声波测井检查炮技术的进一步发展,测定检查炮的传播时间仅仅是为了标定超声波速度测井曲线。用数字方法记下VSP的整个道后可以对所记录的不同波列进行详细分析。

将速度检波器锚定在井壁上,接收来自两个相反方向的信息:下行波和上行波(即反射波)(图1)。

与只能记录反射波的常规地震技术相比,这种能同时记录两种波列的技术显然要先进得多。通过处理,有可能分离这两种波列,因而也就可以从这两个波列中提取详细的信息。

为了详细分析下行波的传播以及准确地分离上行和下行信号,有必要在井中记录大量的测点数据(50至400)。此外,准确了解所有深度上的下行波列可以计算出用于褶积上行波的非常有效的反褶积算子。这样可以处理出高分辨率的VSP资料,并且对地层响应作的假设程度可以最小。

VSP的处理由下列步骤组成(图2):

- 通过叠加和带通滤波改进信噪比。
- 用速度滤波分离上行和下行波列。

为了能在测点距不等的记录上准确地分离上行和下行波列,建立了一套特殊处理方法。在井眼条件不利时尤其需要这种技术。

- 用反褶积以消去多次波,并调整期望输出的波长,以使VSP记录与地震剖面相匹配。

VSP带来的困难是由于它使用单个传感器,而单个传感器既不能记录耦合增益,又不能象地面地震勘探中那样用几百个检波器以均化耦合条件。此外,记录VSP所需的时间常常受到钻机利用率的限制。

3. 记录硬件及程序

记录VSP需要用有简单波形特征并具有最宽频谱的地震震源。使用最广泛的震源是装备有消气泡组件的空气枪,为了利用虚反射(偶极子)以增强高频,气枪的沉放深度较浅。

水枪也成功地用于海上勘探。这种水枪没有一点气泡效应,频谱上的高频成分也很丰富。它非常适用于VSP。

图3是一个部分用空气枪、部分用水枪激发的VSP的例子。只显示了反射波。使用水枪的层段,资料更为精确一些。

将可控震源作为陆上VSP震源的试验也获得了成功。图4在同一口井中对陆用空气枪和扫描范围为12—72的单台可控震源的VSP作了比较。

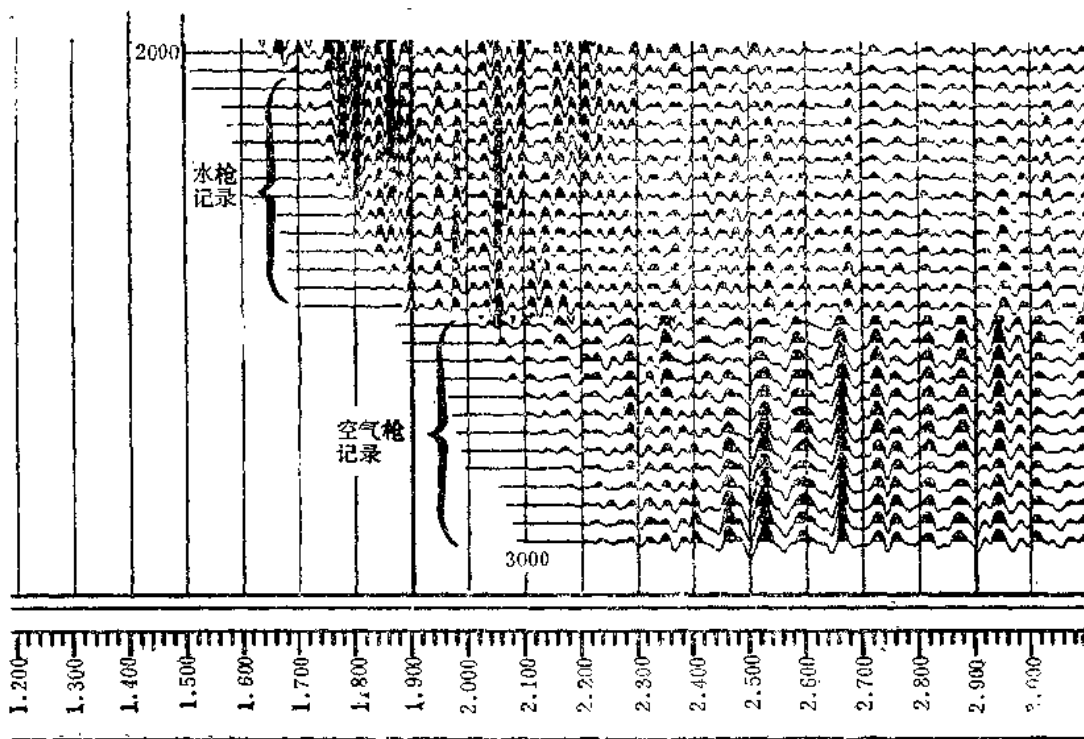


图 3 水枪是一种高分辨率震源。它没有气泡效应，频谱扩展到150赫

目前可选用两种地面记录系统（图 5）：

- 轻便系统；
- 用于斯伦贝谢赛伯服务设备的一套特殊组件。

在上述两种情况下，每毫秒采集一次数据，并用一个动态范围为90分贝的瞬时浮点转换器使其数字化。在九轨兼容磁带（9 track compatible tapes）上进行存储。用若干子程序监视和显示结果。

用斯伦贝谢赛伯服务设备可以在井场上相对于地表参考基准面(SRD)上校准信号；可以对数据作真垂直深度校正；对数据进行滤波；应用真振幅恢复以及计算传播时间（图 6）。

井下传感器是一个用液压操作锚固定的检波器，其特点为具有低噪声、高增益放大器。

VSP记录的测点数最多可达400个放200—2000炮。为了完全分离上行和下行波列，必须每10至50米在井中采一次样。在使用F-K滤波器时，要求按时间均匀采样，即测点间距应该由声波测井传播时间之积分来确定。我们最近已设计出一种速度滤波器，它没有这种需要，在井中不规则采样时也能得到精确的结果。

4. 资料处理

VSP是在野外计算中心进行处理的。处理按下列步骤进行：

——从磁带中检出放炮记录，进行编辑和叠加。

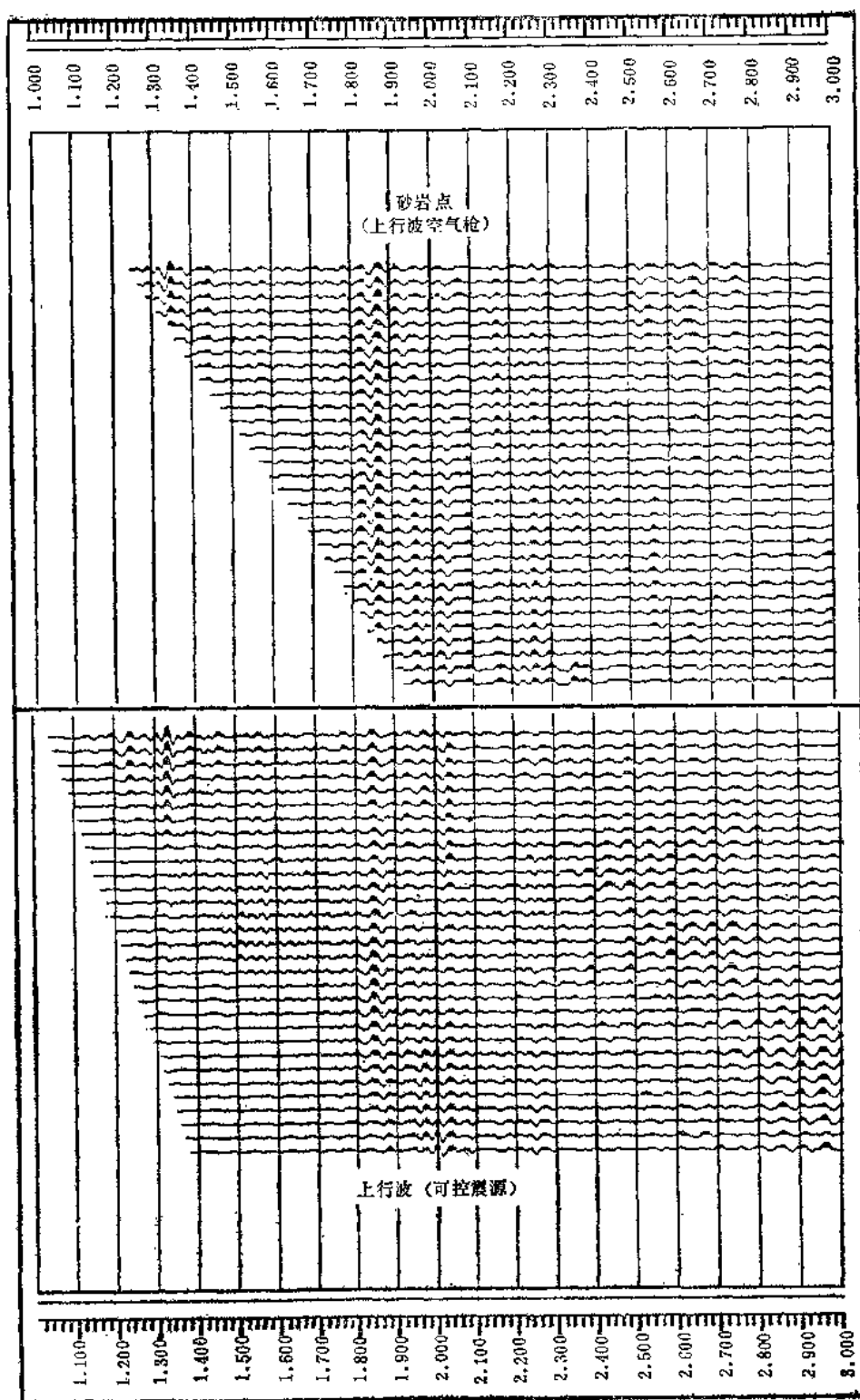


图 4 空气枪与可控震源VSP的比较证明了后者的可行性。可控震源适用于陆上带偏移距的采集工作