

目 录

前言

第一章 垂直地震剖面法 (VSP) 勘探的发展历程

第二章 VSP 一体化技术研究的目的和意义

第一节 VSP 一体化技术研究的目的

第二节 VSP 一体化技术研究的意义

第三章 垂直地震剖面 (VSP) 方法原理和基本概念

第一节 垂直地震剖面法勘探的基本原理

第二节 垂直地震剖面法的基本概念

第四章 垂直地震剖面 VSP 的基础工作研究

第一节 垂直地震剖面采集方法研究及设备配置

第二节 VSP 资料处理的理论基础和方法研究

第三节 处理技术及其关键和系统配置

第四节 VSP 资料解释的基本原则和方法研究

第五章 VSP 一体化技术研究

第一节 VSP 采集·处理·解释一体化的发展趋势

第二节 VSP 采集·处理·解释的一体化技术的思想

第三节 实现 VSP 一体化技术必须考虑的因素

第六章 VSP 一体化技术的应用

第一节 识别地面地震剖面上的反射波

第二节 分析地面地震的勘探问题

第七章 垂直地震剖面一体化技术研究的结论和建议

第一节 垂直地震剖面一体化技术应用成果结论与效益分析

第二节 垂直地震剖面应用建议

致谢

参考文献



VSP 资料采集·处理·解释一体化技术研究

摘要: 垂直地震剖面法 (Vertical Seismic Profiling) 是一种井中测量技术, 采集时地震检波器和地震震源都必须沿着相互垂直方向布设, 它可测量井眼附近地层剖面中传播的下行波场和上行波场的性质, 能够以某些独特而很有价值的方式来利用垂直地震剖面资料。垂直地震剖面可作为一种高分辨率地震技术和层位标定技术, 可对井眼附近作详细研究, 并能精确连结地面地震记录和测井曲线。本项目全面化、系统化地阐述 VSP 资料的采集、处理和解释之间的关系, 并提出垂直地震剖面勘探的一体化的技术思想, 最终付诸于实践加以探讨和研究。垂直地震剖面法在改进地面地震勘探方法、研究地下构造及提供有关参数方面都有广泛用途。这里应用先进的法国 CGG 公司的 GEOVECTOR PLUS 7100 处理系统针对南阳、泌阳凹陷的部分探井进行了 VSP 一体化技术应用的探讨和尝试, 并取得良好的地质效果。

主题词 垂直地震剖面 (VSP) 一体化

ABSTRACT VSP (Vertical Seismic Profiling), a kind of borehole technology, during VSP acquisition, receivers and sources will be arranged in mutual vertical (90°) angle, can measure features of upgoing and downgoing wave fields near borehole, and make use full of VSP information in some special and valuable way. VSP technology, as a method of high resolution geophysical prospecting and a sort of technology of identification of seams, can not only give details about near wellbore formation, but also connect surface seismic record with well-log curves. This project systematically and throughly study the relationship among acquisition, processing and interpretation of VSP, and integration of VSP acquisition, processing and interpretation was realized finally based on application of this technology in practice. Technology of VSP has been widely used in such fields as improving surface seismic method, studying underground constructure and offering relative parameters. Here VSP integration technology was applied in some exploratory wells in NANYANG and BIYANG depressions by using the advanced data procession system GEOVECTOR PLUS 7100 from FRENCH and good geological effects have been achieved.

KEY WORD Vertical Seismic Profiling (VSP) integration

前 言

VSP 作为一种地球物理探测方法和技术, 在油气勘探开发工程中起着重要的作用。垂直地震剖面资料采集、处理和解释一体化技术研究主要是针对企业生产中存在的流水作业弊端, 每一个工作程序由不同单位的不同人员来



完成,相互之间缺乏统一和明确的工作目的和工作目标,采集在接收工作量后仅结合现有的设备和条件,以最大化的效率完成采集任务并转交资料于计算中心,后续的资料处理乃是跑完一成不变的作业流程,所提供的成果只是一张时距曲线图表和随机频率的 VSP 叠加剖面,这势必导致解释用户无法准确标定地质层位,更无从进行详细的地质构造解释。

本项目将从基础理论出发,分别阐述 VSP 采集、处理和解释的基本知识与相互关联的内存联系,由浅至深分析工作中各个环节遇到的具体问题并提出相应的解决办法或途径。最终将从理论方面提出 VSP 采集、处理和解释一体化的思路,重点强调三者中任何一个因素都是 VSP 资料效果成败的关键,由此提出每一项 VSP 工程都必须采用统筹兼顾的一体化技术才是充分发挥 VSP 资料潜在功能的保障。

在充分理论论证的基础上,并将此项技术运用到生产实践,使用 GEOVECTOR PLUS 7100 软件处理完成了不同时期,不同观测方式,不同激发因素的垂直井和斜井、零偏移距和非零偏移距井,累计 20 多口。所提交的成果由为地面地震资料处理服务的层速度、平均速度和叠加速度,反褶积算子,交互处理的叠加剖面,走廊切除剖面和多次分析,钻前预测深度及高分辨率镶嵌剖面,通过分析和应用证明该技术有利于提高 VSP 资料的应用效果,并取得了明显的经济效益和社会效益,最后结合生产实际和 VSP 技术发展趋势提出了建议和下一步的工作设想。

第一章 垂直地震剖面法 (VSP) 勘探的发展历程

垂直地震剖面法 VSP (Vertical Seismic Profiling) 是在地表设置震源激发地震波,在井内安置检波器接收地震波,即在垂直方向观测人工波场,对所观测的资料经过校正、叠加、滤波处理得到垂直地震剖面的勘探方法。

井中记录可以追溯到三十年代,1931 年 SLOTNICK 和 1939 年 DIX 介绍用井中观测测量时—深曲线和时间—速度关系;1953 年 JOLLY 等人曾经讨论利用井中观测研究地下地震脉冲的演化和衰减过程,同年在美国的一口井中直接记录到了地层的反射波。六十年代到七十年代,苏联学者 E·L·GAL'perin 博士研制了专门的垂直地震剖面观测仪器,完善了野外观测方法,形成并发展了 VSP 理论及解释理论,从而使垂直地震剖面法发展成为一套完整独立的新的井中观测技术。后来,欧美各国菲利普石油公司和 CGG 公司及美国地质调查局均做了大量试验工作,进一步发展了数字处理技术并开展了广泛运用。第一个在国际 SEG 年会上进行垂直地震剖面专题讨论的科技会议,是在 1981 年 10 月第 51 届年会期间召开的。至 1990 年有 25% 的预探井或开发井将进行垂直地震测井。在中国的四川、山东等油田也开始了垂直地震测井。

垂直地震剖面法在改进地震勘探方法、研究地下岩性、物性及提供有关参数方面都有广泛用途；近几年，在欧美等国家正在推广垂直地震剖面地震观测方法。至目前为止，垂直地震剖面法的应用领域已遍及矿藏和构造勘探、地震波在地下传播理论研究以及油田开采等各个角落。例如：识别一次波和多次波；预测井前方地层的深度；计算反射层的角度；确定层速度；研究井附近地层的岩性、声阻抗、弹性参数、速度、速度的各向异性、孔隙度、渗透率；识别低阻抗异常预测井遇前方的高压层；确定最佳的成像频率；真振幅恢复；子波处理和吸收衰减的研究及高分辨率法确定断层、注气通道、陡界面和盐丘等等。

河南油田于 1986 年初，进行了 VSP 技术可行性论证，并引进了全套 VSP 技术设备，组建了 VSP 专业队伍，至 1993 年底，相继在我油田的泌阳凹陷、南阳凹陷、太康隆起以及冀东油田完成 VSP 测井 32 口，并在 PE-3284 机和微机（386 或 486）上开发和移植了 VSP 处理软件。在资料解释方面，VSP 成果资料已成为一项重要的基础资料，用于地质构造的综合研究。92 年 4 月，勘探公司主持召开了我局第一次 VSP 技术研讨会，全面总结了以前 VSP 技术在资料采集、处理和解释方面的技术经验，肯定了零偏 VSP 技术已经成熟，非零偏 VSP 技术和横波技术需要进一步深入研究，特别是资料处理方面需要进一步完善和提高。地调处于 94 年和 97 年先后以“VSP 技术的推广应用”和“VSP 处理系统的特点”等为课题开展了 VSP 技术的专项研究。2001 年又召开了 VSP 新技术新方法的推广应用及开发地震研讨会。

然而，目前我局对 VSP 资料的开发应用还处于初级阶段：只限于用零偏纵波 VSP 资料求取的地震波速度进行时-深转换以及用 VSP 合成记录对地震剖面作层位标定等。本项目是在此基础上，对 VSP 技术进行了拓宽研究，其中包括利用 VSP 资料提取真子波，作为反褶积算子用于地面地震资料的处理；用 VSP 初至波和上行波关系预测未钻遇地层，标定地震层位；用 VSP 资料波的传播关系识别地面地震记录上的多次波等几个方面。

整体来说，VSP 技术近年发展的速度特别快，不管在国内还是国外，各自在不同的研究领域都取得很大的进展，总体进步表现为：观测仪器和设备已达多道井下数字记录仪器和 VSP 三分量检波器；井下震源的发展已使井间地震和井间 VSP 的施工成为现实；资料处理叠前偏移技术和波场完全分离效果在现有技术状况下已完全可以实施。

第二章 VSP 一体化技术研究的目的和意义

第一节 VSP 一体化技术研究的目的

从广度方面分析，VSP 资料应用已从地质层位的标定和速度求取向地质构造形态判断和工程勘探领域及深层地壳构造研究发展；从精度方面分析，



VSP 资料已不再单独追求垂直地震剖面上的信噪比,而是在此基础上向高精度的分辨率勘探发展;从作业方式发展分析,VSP 的采集已从地面作业向地下井中激发接收采集、井地联合采集和三维 VSP 采集转化,且井间地震作业方式已完全成为可能。在油气田的开发地震中 VSP 方法将发挥越来越重要的作用。

具体地,垂直地震剖面与地面地震剖面相比具有以下优势:

- (1) 垂直地震剖面法是通过波场在垂直方向的分布来研究地质剖面的垂向变化,因此波的运动学、动力学特征更明显、更直接、更灵敏。
- (2) 垂直地震剖面可以在介质内部紧靠界面附近观测,因而可以直接记录到与界面有关的较纯的地震子波波形。
- (3) 由于垂直地震剖面法直接在介质内部进行观测,因而有可能避开和减弱剖面上部低降速带的干扰,易于识别波的性质,而且地震噪声水平随深度迅速衰减,从而可以大大提高仪器的有效灵敏度,并使弱波的观测成为可能。
- (4) 垂直地震剖面观测时,不同界面的波到达井内测线上各点的方向可以来自上方,也可以来自下方,而且在界面附近发生突变,所以垂直地震剖面可以有效地利用波的到达方向这一信息。
- (5) 由于垂直地震剖面法能避开剖面上部低降速带的干扰,所以能够较准确地观测波的质点运动方向,因而可以利用波的“空间偏振(或极化)”这一特别灵敏的参数来研究波的性质和地层岩性。
- (6) 具有投资少、见效快的特点。

由于 VSP 的这些优点,所以它在较短时间内被广泛接受和应用,成为近年来世界范围内地球物理勘探中最活跃的领域之一。这也正是开展项目研究的目所在。

第二节 VSP 一体化技术研究的意义

河南油田勘探潜力具有广阔的前景,南阳、泌阳凹陷和焉耆盆地都有良好的油气远景,特别地,地质综合研究认为泌阳凹陷东南部深凹区是寻找岩性,断层加岩性圈闭油气藏的有利地区,为更好地利用地震、地质、测井、油藏描述相结合的方法进行综合研究,必须做好 VSP 资料储层标定技术的应用研究。为搞清泌阳凹陷速度信息和进行精确的 VSP 储层标定,准确地确定地震反射层的地质层位和深度,识别多次波,为地震资料的处理和解释提供参数。

原始 VSP 资料和常规地表地震资料一样,既包含有用信息,也包含各种相干和随机噪声,而且有用信息往往被噪声掩盖。此外,其有用信息本身的存在也并非都是单一、集中和明显的,它们互相交织、互相干涉,分散和隐藏在观测数据总体之中。因此,原始 VSP 资料必须经过处理,才能用于解释,并且处理得越有效,提取的有用信息越多,利用才越充分。对于垂直地震资



料的处理目的可以归纳为两大任务：信息增强与处理及信息分析与提取。

垂直地震剖面技术的进步和发展要求 VSP 应该面向最终用户对象进行采集、处理和解释。所以在完整的 VSP 工作程序中的初步阶段——采集时期，要求从地质任务的目的和技术要求的具体指标出发，结合现有的处理手段进行详细的采集设计，以便给处理人员提供包含高信噪比和分辨率成份丰富的原始采集资料。资料处理作为 VSP 的重要环节，也在 VSP 资料勘探全过程中直起着承上启下的功能，所以要求对原始资料进行高保真、高信噪比和高分辨率地处理。当 VSP 资料的解释与研究和应用作为最终用户时，一方面对 VSP 资料的采集和处理进行鉴别和评价，另一方面要对油气田的开发工作提供明确的地质诊断，因此解释过程中应该全信息地应用 VSP 资料中的所含有的地震地质信息。

本项目研究的意义就是基于 VSP 资料的基础理论知识和实践中具体问题的解决方案，全面化、系统化地阐述 VSP 资料的采集、处理和解释三者之间的关系，并付诸于实际加以探讨和研究，最终提出垂直地震剖面勘探的一体化技术思想。

第三章 垂直地震剖面 (VSP) 方法原理和基本概念

第一节 垂直地震剖面勘探的基本原理

垂直地震剖面法是地震速度测井技术的扩展。它不仅利用了直达波的信息，而且还充分利用了各类续至波信息，通过对地震波的分析能获得大量有益信息，并利用这些信息研究波场、波速、岩层产状、岩石孔隙度等为直接找油找气提供可能性。垂直地震剖面法的应用包括反射波的鉴别、多次波的分析、波形的研究与波的转换、传播参数的测定、钻井前方预测、地震地层学分析等；

VSP 方法是以弹性波理论为基础，在地表设置震源激发地震波，在井中设置检波器接收地震波，即在垂直方向观测人工波场。如图 1 所示，左边为 VSP 野外施工的示意图，右边为五个检波器接收到地震波后因响应面起跳的波组示意图，其中第一组波为下行直达波，第二组波为下行多次波(层间多次)，第三组波为一次上行反射波，第四组波为多次上行反射波。下行直达波、上行反射波、下行

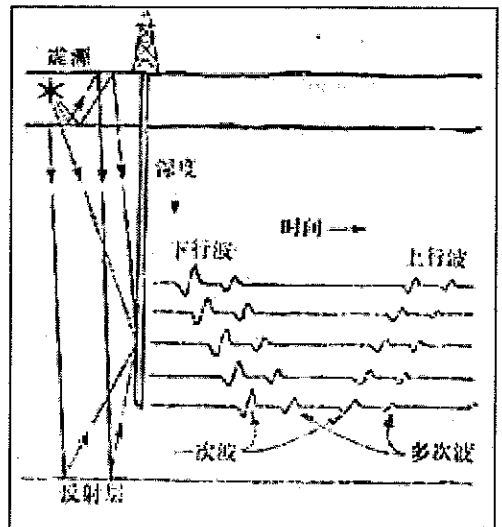


图 1 垂直地震剖面勘探原理图

反射波是垂直地震剖面中的主要地震波，它们自激发点传播到接收点的时间与路程的关系可用时距曲线表示：

① 下行直达波时距曲线方程：

$$t = \frac{l}{v} \sqrt{h_i^2 + l^2}$$

② 上行反射波时距曲线方程：

$$t = \frac{l}{v} \sqrt{(2H \sin \phi \pm l)^2 + (2H \cos \phi - h_i)^2}$$

③ 下行反射波时距曲线方程：

$$t = \frac{l}{v} \sqrt{(2H \sin \phi \pm l)^2 + (2H \cos \phi + h_i)^2}$$

方程式中， v 表示平均速度， h_i 表示观测深度， H 表示激发点至界面的法线深度， l 表示大井至激发点的距离， ϕ 表示地层倾角（以上前提条件假定介质是均匀界面）。

VSP 方法是将检波器固定在钻井壁上，其测量结果基本上包括在地层剖面中传播的所有上行和下行地震波场。垂直地震剖面用地表和地下反射体之间实际地质体地震波场的几个紧密空间间隔的直接物理测量代替了地面地震法的大部分推理。

理想化的典型垂直地震剖面法观测系统（图 2 左）；震源设置在地面或靠近地表处，一组检波器固定在井中，下行直达波和上行反射波在各个测点上依次被记录下来。由于理想的纵波震源子波没有噪声，只有一个简单的水平反射界面，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，并根据到达时把它们鉴别出来（图 2 右）。反射波的深度用其特征和波形都容易确定。

在记录 VSP 资料时，由于检波器被放置在远离地表之下的位置，因此其响应是上行地震波和下行地震波。因为下行旅行波至与检波器放置于地面所记录到的资料不能同等对待。地表与地下检波器布设的排列方向相差 90 度。标准的地面地震记录无法分离上行和下行波至，在垂直地震剖面中由于能够记录上行和下行波场使得 VSP 资料能够应用到其它独特的勘探解释中。

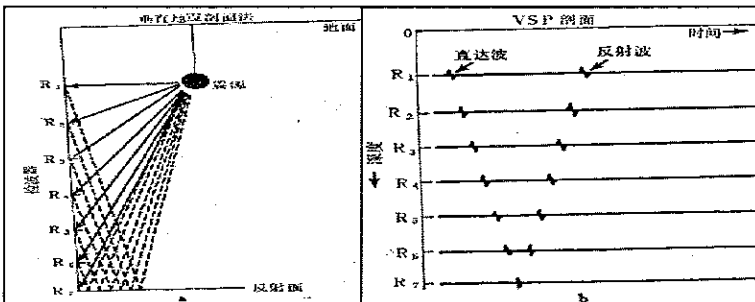


图 2 垂直地震剖面法观测系统

第二节 垂直地震剖面法的基本概念

一. 垂直地震剖面的基本分量

垂直地震剖面作为一种重要的勘探方法，为了对 VSP 的资料质量进行实时监控，在 VSP 采集、处理和解释的整个过程中的各个环节都应当了解 VSP 记录上的分量。表现 VSP 资料的通常方式是沿着垂直坐标轴绘制检波器深度 z ，沿水平坐标轴表示记录的时间 t ，按 $z-t$ 空间绘图，下行地震波场分量为向右下倾的同相轴，上行波场分量为向右上倾的同相轴。第一个下行波为初至波 FA，初至波以后的所有下行波同相轴都是下行多次波 M。只有下行初至波产生一次

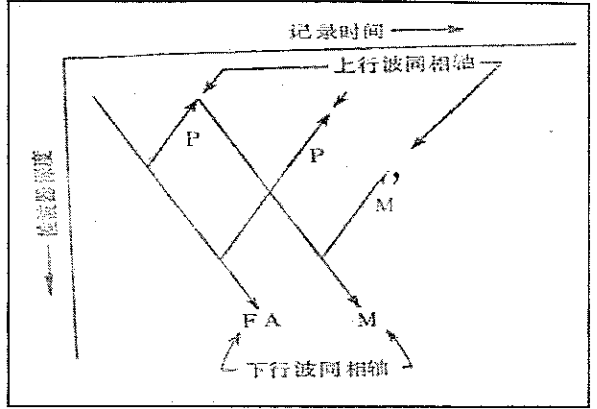


图 3 VSP 资料分量分解示意图

反射波，在初至波产生一次反射波的同时，下行多次波产生上行多次波。因此整个垂直地震剖面记录上，任何一个能够向下追踪到下行初至波的上行波，都是上行一次波 P，而任何一个向下不能追踪到初至波的上行波都是上行多次波 M'（图 3）。同时井筒波也为下行波同相轴，它是垂直地震剖面上经常出现的液体噪音的形式。

二. VSP 中遇到的噪音问题

为使垂直地震剖面资料质量最佳化，必须减少包括检波器耦合在内的井下噪声。就速度测定而言，能以高信噪比记录到初至波就行了。在垂直地震剖面测量时，必须用高信噪比记录包含在许多强的下行震源波形中的上行反射波和多次波在内的整个波列。震源产生的噪音问题主要包括到达井口或浅层套管的水平传播能量及作为套管波、井筒波和电缆波向下传播的能量。因为它们的视速度低、频带较宽，在资料处理时该噪声干扰大多数上行反射波。产生井筒波的震源的能量随着距离的增大而迅速衰减，因此震源应尽可能远离井口处，使产生的井筒波减到最低限度，强震源产生更强的井筒波。当检波器耦合不好时，记录的井筒波最为明显。

在野外施工和资料处理过程中经常遇到的噪声种类大概有：风、地滚波、声波、微震电力线干扰、地

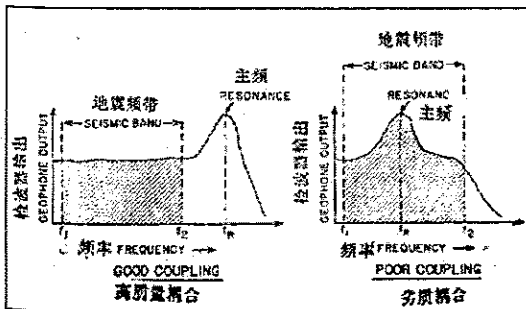


图 4 检波器耦合冲击试验



面文明噪声及检波器与井壁耦合不佳造成的干扰。图 4 是针对检波器的耦合条件进行了冲击激发试验,当耦合良好时有利于提高反射的主频和频带宽度。为了排除它们在后续工作带来的麻烦,在 VSP 资料的采集过程必须采取措施加以处理和解决。诸如防止直达波畸变及其后的共振现象要求保持良好的检波器耦合;避免电缆波产生的噪声干扰;保证复合套管之间接触完好,使其不发生套管柱中的谐振;设法破坏由井液产生的管道波;尽量保持采集井场的环境安静减小地面文明噪声。

第四章 垂直地震剖面 VSP 的基础工作研究

第一节 垂直地震剖面采集方法研究及设备配置

一. 垂直地震剖面法采集工作研究

1. 震源的类型与研究

(1) 震源的选择

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。记录系统最好与野外地面地震相同的震源,最理想的震源应该具备下面三个条件:1)可在低速层以下激发;2)震源脉冲可控;3)保持震源恒位。通常使用的震源类型有:炸药、(单个或组合)可控震源、地面空气枪、海洋气枪及井下气枪。现结合生产实际和项目研究内容分析相关的震源特性。

① 烈性硝甘炸药

化学炸药(总称)是激发地下地震体波能量特别有效的发生体。炸药震源的信号频率高,频带宽,并可得到较高的输出振幅。但要想使用这种炸药获得相当稳定的爆炸子波,野外必须满足两个条件:第一,必须仔细准备爆炸井,使放炮过程中保持井径和深度的相对稳定。最佳条件是使激发井钻到风化层以下适当的深度,并从井底到井口装上套管同时用水泥固结,还要在井中装满水。第二,炸药包必须尽可能小。炸药包上面有一柱水体充填时会使有意义的信号加强。应该注意炸药震源激发的高频成份,大部分在地下迅速衰减掉。

② 陆上用可控震源

连续振动的震源,移动迅速,允许勘探人员以有效和迅速的方法使用许多不同的爆炸点进行 VSP 试验。同时可将振动器的频率范围调整到合乎实际地层的 VSP 记录中,以满足必需的勘探分辨率要求。通过改变振动器的大小和数量或者通过改变个别振动器的输出装置,就能按照最佳的信噪比来修正输入能量的幅度。其一般规则是当 VSP 井场受到随机干扰影响时,则振动器就是最好的震源选择,因为只要采用必要的相关处理就可以排除在连续变频振荡范围外的噪声。相反,将几个连续变频的振荡信号相加,即可消除变频振荡范围内的随机噪声。但是如果在振动器连续变频范围内存在频率相干噪



声, 则相干处理只会加强这些噪音模式。

③地面气枪

避免了炸药震源的大部分问题, 不需要炮井, 几乎可在同一个固定点上无限次激发, 但此气枪激发的固有频带窄。多枪组合激发需要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, 以保证多枪同步激发。

液体中高压振动气泡物理参数可用瑞利—威利斯 (RAYLEIGH—WILLIS) 公式描述:

$$T=1.14(\rho)^{0.5}(KQ)^{0.333}(d+33)^{-0.833}$$

公式中, T 为振动周期, ρ 为液体密度 (gm/cc), Q 为压缩气体泡的势能, K 是取决于所选择 Q 单位的常数, d 是液体中气泡离开井中心的深度的距离 (inch)。公式的物理性质分析是: 可通过改变压缩气泡的势能 Q 或改变产生气泡的深度 d 来改变气泡振动周期; 也可通过改变气枪储气体积或操作压力来改变势能, 通过这两种选择来改变气枪的储气体积借以改变振动周期。为了合理设计气枪组合, 以产生具有最佳分辨率的爆炸子波, 有两种方法: 一是设法排列两个或更多个气枪组合以使各自气泡振动趋于互相抵消; 二是要尝试抵消单个气枪气泡的振动, 研究一种具有不同峰值频率的气枪排列, 以使排列的合成频谱尽可能宽。

震源信号应由近场源检波器即井口检波器进行监测, 并用频谱平衡技术使此种信号变化减少至最小。若井口检波器安置得正确, 则可记录到与井下检波器相同的频谱变化, 这样平衡井口检波器信号的频谱形状的统一滤波器可平衡井下检波器信号的频谱形状。理论上在频率域中由 $G(i)=M_{sve}/M(i)$, 其中 $G(i)$ 为用于第 i 次激发的滤波器, M_{sve} 代表相对该井口检波器监测的波形, $M(i)$ 为所有监测波形的平均。然后将该滤波器用于第 i 次震源激发的检波器信号。该方法既不抑制气泡脉冲, 也不给频谱增加白噪声, 只是将震源波形标准化为监测波形。

气枪震源和可控震源对比: 二者输出能量近似, 可控震源的一致性较好。但是由于可控震源是在地表激发而气枪是在水槽中激发, 所以可控震源产生的瑞利面波较强。若 VSP 勘探的目的是寻找深部的小构造, 则震源的频率特性就显得更为重要。可控震源的激发频谱高于气枪激发的频谱; 气枪激发的能量传播较深, 但频率偏低。研究较深的目的层时, 显然可控震源好些, 可控震源的频率虽然高, 但其管道波也相应增强, 而气枪震源的管道波较弱且穿透力较强, 唯一缺点是频率偏低。

2. 炸药震源特性研究

(1) 炸药爆炸的机理研究

炸药在介质中爆炸的瞬间物理过程是炸药爆炸时产生的强烈的压缩波在介质中产生冲击波, 并向外传播, 同时使爆炸的空腔向外扩张; 当空腔停止扩张时就意味着冲击波形成的结束; 冲击波在介质中存在的时间极短, 随



着传播距离的增加,很快兑变为应力波;应力波又逐渐过渡到地震波。也因此将爆炸形成的波场分为三个区:冲击波传播的区为“近区”,应力波传播的区为“中区”,地震波传播区为“远区”。实际上在岩石中爆炸可分为相应的“破碎区”、“塑性区”和“弹性区”。

① 冲击波的形成

冲击波的波速、压力和能量随着距离的增加而快速衰减,在离开爆炸中心的 $10-25R_0$ (R_0 为药包半径) 处,脉冲传播速度趋近于声速,硬岩石中的冲击波速度转化为应力波速度。爆炸的起始阶段,由爆炸波向周围介质释放出的能量只是引起爆炸产物及周围介质运动的炸药化学能的一部分,转移到离开爆破震源一定距离的介质中的能量是衡量有用功的标准,这可用冲击波的能量来表示:

$$A(R) = \int_{t(R)}^T 4\pi R^2 P v dt$$

其中 R 是球面半径, $A(R)$ 为冲击波做的功,即冲击波使该面运动所做的功, v 是半径为 R 的球面上质点运动速度 (m/s), $v dt$ 为在时间 dt 内表面的位移, P 为超压 (kg/cm^2), t 为压缩作用的时间。

② 液体在高压下的状态方程

介质的状态方程通式为 $P = P(\rho, T)$, 式中 ρ 为一定压力下的介质密度, T 为压缩状态下的介质温度。对于水介质其压力可表示为:

$$P_B = A_B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right]$$

式中 ρ_0 为未扰动介质的密度。

③ 水中冲击波阵面压力参数

水中冲击波波阵面压力的计算通式是

$$P_{\max} = A \frac{1.13G^{1/3}}{R^{1.13}}$$

式中 A 为常数 (TNT 炸药取值 533), G 为药包的重量 (kg), R 为距爆炸点的距离 (m)。

④ 土中冲击波参数

冲击波阵面传播速度在传播过程中衰减的程度依赖于炸药的性质、药包正式形状和土的性质。土的压实度或体变形可用下式表示:

$$\theta = 1 - 1/\alpha = v/N$$

式中 α 表征冲击压缩性 (爆破运动之后的密度与爆炸前的密度之比), 可在离爆心很远处被观测到。当相对距离相同时,柱状炸药包引起的体变比球状药包大。



在含有少量气体成分的水饱和砂土中，质点移动速度和压力较大，可采用

用经验公式计算波阵面最大压力：
$$P_{\max} = R_1 \left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^{n_1} = \frac{R_2}{\gamma^{n_1}}$$
，式中 R 为距爆

心的距离 (m)，G 为 TNT 药包重量 (kg)。

(2) VSP 震源的野外对比试验

试验内容包括：震源信号的频带宽度、勘探界面深度与震源能量关系、震源子波的一致性、与震源有关的 VSP 噪声、体波能量与各种震源强度的关系。由于地震子波的形态在很大程度上取决于爆炸产生的冲击波，客观上也肯定与爆炸激发的围岩有关，例如水中激发、土中激发、岩石中激发，另有井孔中充填物的性质与类型：充填土、砂、石及含水性都与激发子波形态密切联系。所以这些试验内容主要涉及的激发因素有：埋置深度、药量大小、炸药类型、激发井孔不同的物理环境及其产生子波的研究。为此进行了不同炸药类型和不同激发药量的试验，并通过定性分析和定量分析相结合的方式进行系统分析，可得出关于子波特性的结论：

I、定性分析结论：由于存在面波和虚反射的影响，随着接收点深度的加大，观测到的子波有效区范围在增加。从脉冲宽窄和延续相位（可能有虚反射）对比可知用小药量炸

药激发时爆炸的稳定性好，所形成的子波较为理想，且具有脉冲窄、延续相位能量较弱特点（图 5）。

II、定量分析结论

从子波频谱分析可知，高爆速炸药（ZY-Ⅱ、TNT）激发形成的地震子波的主频高，而低频成份的能量弱；低爆速的硝酸炸药、胶质炸药所产生的子波的低频成份能量强，主频偏低且随着药量的变化而变化（图 6）。从子波能量与炸药能量关系（图 7）对比可知：井下接收的子波受其它因素（如低、降速带）影响小，可准确、可靠地分析其能量或平均能量与其它参数（如子波振幅与药量大小）的关系，并进一步拟合出相应的数学关系式，主要表现为线性关系、线性+抛物线关系、抛物线型关系。

III、子波能量衰减：从药量与子波平均能量曲线（图 8）可知，不同药型、不同药量激发时，子波的平均能量在高速层中的衰减幅度随着药量的增加而加大。

3. 关于 VSP 激发震源所引起的问题与解决方法的研究

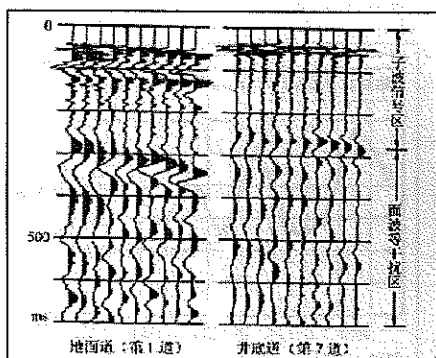


图 5 同一药型不等药量（左大右小）激发子波对比

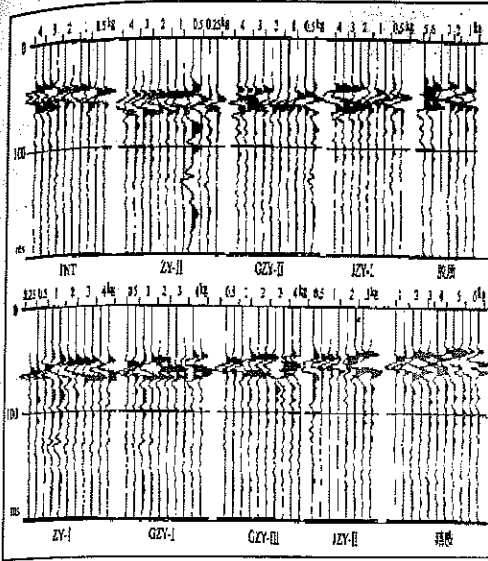


图6 不同药型、药量激发子波对比试验

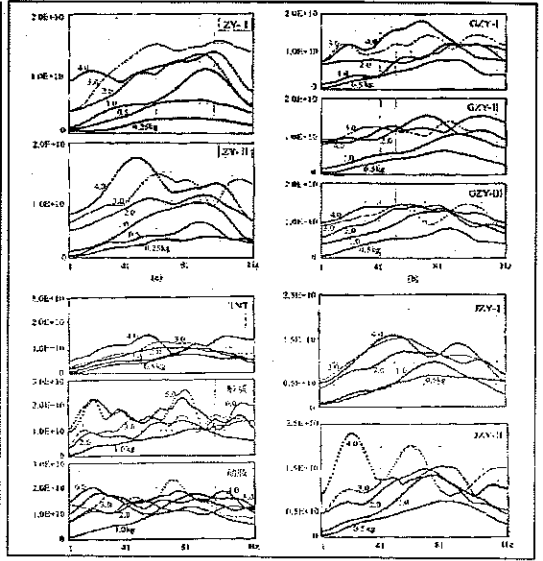


图7 激发能量与药型、药量的关系曲线

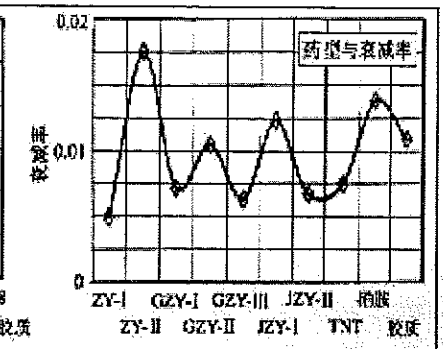
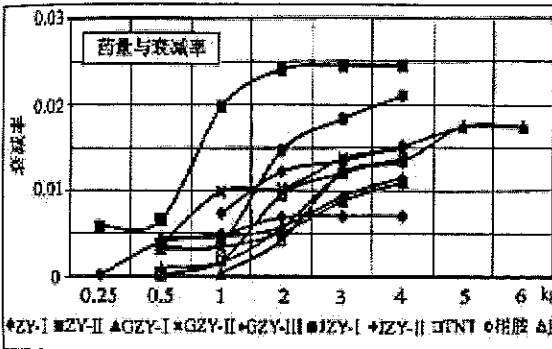


图8 子波能量衰减与药量、药型关系曲线

(1) 震源波形变化

理论上讲，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，可得到等效的数据组，但仅当震源波形一致时，两组数据才能等效，但在使用炸药情况下这是少有的，即使使用地面气枪震源波形也可能不一样。当气枪反复激发时，震源下面的土壤逐渐被压实，引进震源波形“漂移”，总是引起震源波形变化。而震源波形的变化给资料处理和解释带来很大的麻烦和困难。若逐个测点上的波形都在变化，速度滤波后的资料将会严重变坏。在解释时，各测点的波形可能不同，但不能由此对介质的物理性质作出部分地推断和猜测。

为补偿震源波形变化，可计子波整形滤波器，同时在示波器上选择测量出的一个震源子波转换为标准子波。再把这种滤波器用于相应的井中记



录,即可获得一套新的 VSP 资料,它接近于震源波形不变情况下的野外记录。

(2) 弱信号处理

地面空气枪与炸药震源相比其不利条件就是震源信号能量幅度低,因此常采用多次激发或多个震源组合激发来增加能量。假若所用的震源能够严格同步,则信噪比(S/N)与组合震源的个数成正比,而使用复合叠加处理时,则仅与震源个数的平方根成正比。

(3) 表层混响和虚反射

地面虚反射和低速带虚反射可能严重影响采集资料的面貌(图9),图中1为下行直达波,2为降速层多次波,3为地表多次波,正因为多次波的存在会使许多有效信号被掩盖。所以除了采集时选择好的激发岩性外,处理时用于波整形至少可以部分地补偿这种影响。若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方法估计震源脉冲的特征。

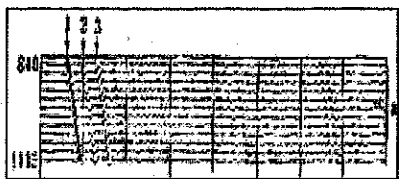


图9 近地表多次反射记录

(4) 被高振幅下行波和强干扰掩蔽的反射波

由于上行反射波与下行波相比振幅太小,所以记录上几乎见不到上行反射波。若让负视速度的上行波通过速度滤波处理,并对各道作时移校正,这样地震同相轴在垂直方向就可排齐了。处理后相干的上行反射波明显了,同时还可根据深度标尺确定反射源点范围。所以速度滤波是垂直地震剖面法中必不可少的组成部分。

(5) 压制井筒波的方法研究

在 VSP 勘探中管道波是最强的相关噪声源。井筒干扰波定义为井眼附近的一种地震扰动。最强的一种井筒干扰波是通过液柱传播的纵波;另一类是沿着套管向下传播的(套管波至);还有一种局限于井孔与围岩的分界面上。井筒波几乎不包含岩性信息并能严重干扰有效的体波记录。由于它们仅局限在井眼中,很少扩散,所以在深层地方它们的振幅相对于体波来说,可能非常大(5—10倍)(图10)。减少井筒波的最有效方法是震源远离井口。大多数井筒波的扰动是从地表进入井中的方式,不是来自震源的直达波,其能量是沿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波,另外速度滤波也常常可以压制这种干扰。一些井筒波的振幅可能很大,即使采用了一切压制它的办法消除后仍然存在,所以 VSP 资料

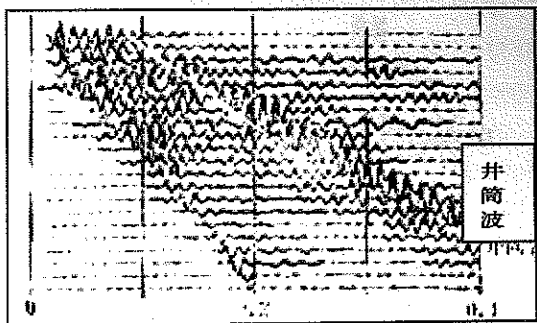


图10 含有强井筒波的 VSP 记录

的扰动是从地表进入井中的方式,不是来自震源的直达波,其能量是沿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波,另外速度滤波也常常可以压制这种干扰。一些井筒波的振幅可能很大,即使采用了一切压制它的办法消除后仍然存在,所以 VSP 资料



的最终分辨力可能受到井筒波的控制。

管道波一般成因有两个：①由于钻孔本身的物理机制所致。当某压缩 P 波传播到钻孔时，因井壁（套管）与井液间波阻抗差别很大，这时就会产生一个沿井壁传播的管道波。②由震源机制所致。当震源产生的瑞利面波（地滚波）通过井口时，沿井液表面产生的垂向振动也可产生管道波，且是管道波最主要的成因。

几种压制管道波的方法原理：当钻孔中的液体（水或泥浆）的任何部分被扰动时，就会产生其频率刚好包含在地震频带范围内的管道波。充满空气的井孔不会产生管道波，管道波是沿着井孔轴线方向传播的波，该波不能呈辐射状散射，由于它只沿着一个方向传播，所以它也不存在衰减问题。实际上管道波只在井壁内很薄的尺度上传播，它所提供的地层信息比 P 波、S 波少得多。

目前无任何方法可在野外压制第一种管道波，因为油气井在各个深度上的波阻抗无法等于 0。因此压制管道波的野外方法，首先是全力压制井口附近的瑞利面波或阻止其能量向井液中转换。有效衰减到达井口瑞利波能量的方法是：

①设法增加激发点到井口的距离。因为瑞雷面波是振幅是随着传播距离的增加呈指数形式衰减，因此增加炮-检距就可有效减小井口附近的面波振幅。经过动校正及速度滤波处理可压制管道波，提高下行波列。

②在激发点和井口之间增加一些障碍物以阻止瑞利面波向井口方向传播。最常见易实现的方法是在距离激发点 $\lambda/2$ 处挖一条沟（图 11）。长度是使瑞利面波的波前不至于从沟两端绕过再影响到有效波的观测为宜，这样对瑞利面波有一定的压制作用。有时地形、地貌（山谷、小河、水渠、山丘或凹地可代替人工沟槽）。

③使用组合震源压制瑞利面波的方法。VSP 试验中若知道瑞利面波的波长，又有足够的振源，就可使用一个最佳组合震源去消除管道波。

④防止瑞利面波的能量在井液中的转换。

最好是在它还没有转换成管道波之前把它压制掉，瑞利面波是以震源为中心沿地表自

由表面向四面八方辐射的波，在垂向深度上其振幅随着离开自由表面的距离呈指数衰减。其数学表达式为： $e^{-kz} = \exp(-2\pi z / \lambda)$ ，其中 λ 是面波波长， z 是深度。当 $Z = \lambda/2$ 时，它的振幅只是地面上面波振幅的 0.043 倍，即

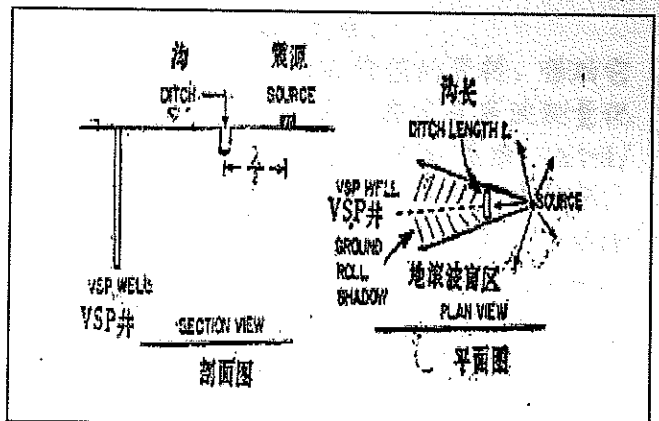


图 11 野外采集时为压制面波而挖的质量沟

$$e^{-k\lambda/2} = 0.043$$

如果泥浆顶距地面不小于 $\lambda/2$, 则只会有极少数面波的能量传到泥浆中, 降低泥浆水平面可有效压制管道波, 即是使井口的面波很强也可起到一定的压制作用。

二. 采集方法研究

(1) 时间采样间隔

时间采集间隔作为 VSP 采集的关键参数, 涉及处理、解释和费用等后续一系列的工作研究和行为决策的确定, 所以必须慎重选择, 确定时间采样间隔一般按照下列公式进行:

$$\Delta t \leq 1/2f_{\max},$$

其中 f_{\max} 是信号最高频率, 从频带上考虑 1-4ms 都可完成地质任务, 从数据处理上考虑 1ms 或 2ms 都比 4ms 好, 在某些数字处理程序中 (如反褶积) 采样密度高, 子波更理想。

(2) 深度采样间隔

通过对垂直地震剖面应用空间滤波可实现上行波和下行波的分离。所有空间滤波技术都依赖于精细的检波器深度采样间隔以防止假频, 并能在滤波后保留宽带的地震资料, 内插等先进的处理手段有助于使过大的检波器采样间隔所引起的不必要的假频影响减低到最小。为使资料处理后具有宽带信息, 测量时必须在最小期望波长内采样两次。在 VSP 勘探中, 时间采样间隔一般不会差错, 但深度采样间隔易搞错。在检波器采样间隔不变的井中, 应用下列方程进行设计可使假频减到最少:

$$\Delta Z \leq V_{\min}/2f_{\max} = L_{\min}/2,$$

其中 V_{\min} 是井孔周围地层的最小波速, f_{\max} 是子波的最高频率, L_{\min} 是处理后期望的最短波长; 这就是尼奎斯特 (NYQUIST) 采样定理。

VSP 井的声波测井曲线对于新的 VSP 勘探区是很有价值的资料, 借助它可确定 VSP 深度采样间隔, 也可用来校正深度记录误差。在没有声波测量记录情况下, 为了避免假频干扰, 采样间隔应该取小一些, 存在关系: $\Delta t = 1/(2\Delta Z * f_{\max}) = 1/V_{\min}$, 其中 ΔZ 是深度采样间隔, f_{\max} 是子波的最高频率。改变 ΔZ 和 f_{\max} 就可改变速度截止线的位置, 若 f_{\max} 不能或不易改变, 为消除假频就只能改变 ΔZ , 使得速度截止线移到理想位置。当检波器采样间隔较小时, 处理中可保留频率较高和波长较短的资料, 但检波器间隔过小必定会增大测量时间和费用。

通过频率—波数 ($f-k$) 付里叶变换 (图 12), 可以判断资料中的假频。上行假频干扰了图中右下部的下行波列, 而下行假频干扰图中左下部的上行波列。

(3) 共深度点的多次叠加

即将同一深度点若干地震炮所得的记录相加起来作为检波点 VSP 记录能



量的处理方法,同时也是压制白噪声的有效手段之一。

三. 垂直地震剖面采集设备配置及物理环境

1. 垂直地震剖面所需的设备

进行垂直地震剖面观测时常常将震源布设在地表附近或地面,并在井中按相间的距离布置检波器,记录震源在地下产生的地震波。垂直地震剖面法的野外技术试验中

主要涉及钻井、震源、观测系统、井下检波器、记录电缆、记录系统、干扰波等因素或设备。

井下检波器装置通常是一个 VSP 检波器组合体。VSP 检波器装置中,可按三种几何形态中的任何一种进行布置:(1)垂直方向;(2)三分量 XYZ 方向;(3)以 45° 角倾斜的三分量方向;垂直地震剖面法中一个主要的技术要求是需要多分量检波器,如法国 Geo-Lock,美国的 Wts-1100。理想的野外工作配置:高质量的仪器,即记录系统具有足够宽的通频带,不能发生道间串馈噪声,有效信号要有足够的增益,并能压制无关的电信号进入数字记录,测试前应对整个系统进行全面校验,确保在测程允许范围内其输出信号有足够大的能量,深度记录要精确。有了详细的采集程序和资料处理,就能得到地层传播特性、多次波反射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;

2. 垂直地震剖面采集步骤与物理环境

(1) 垂直地震剖面采集步骤

在 VSP 勘探测量中检波器是点测形式,因此需要反复升降,而声波测井、电阻率测井和其它测井则是连续提升。VSP 数据采集的流程如下:

- 1) 将检波器提升到预定的观测点上,并将检波器推靠在井壁上;
- 2) 放松电缆后进行数据采集;
- 3) 开动绞车拉直电缆。
- 4) 放松推靠器,把检波器移到下一个观测点处;
- 5) 再打开推靠器把检波器推靠在井壁上,放松电缆对下一个点进行记录;

(2) 垂直地震剖面采集的物理环境

在完成研究检波器外壳沿着某个方向振动时的输出极性敲击试验之后,还必须考虑钻孔的物理环境因素:

- 1) 井的垂直性及钻孔的畅通状况;

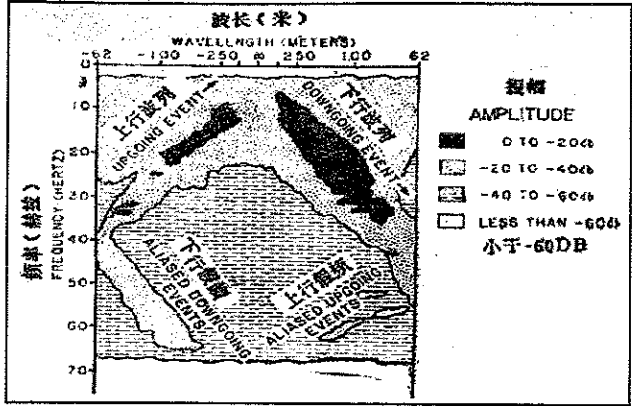


图 12 在 f-k 域中滤波识别假频现象

- 2) 保证界面耦合的套管和固结条件;
- 3) 钻井直径具备必要条件是穿过钻孔的地震子波的波长必须超过钻孔圆周(而不是钻孔直径)的十倍,以避免“钻孔波的阴影部分”;
- 4) 详细的钻井壁周围地层物理特征的资料,诸如井径、地震声学、密度、电法和放射性测量和井位上的地表地震条件资料。

第二节 VSP 资料处理的理论基础和方法研究

垂直地震剖面法(VSP)是众多地震勘探方法中有力的手段,但它的价值只是在广泛的处理野外地震原始资料之后才充分体现出来。借助于这种处理可建立重要的岩石特性与声波特性之间的关系,一般可得到测井曲线与地面地震资料剖面的密切而可行的联系。

垂直地震剖面就是在一口井内不同深度的测点上记录地震波能量。由于剖面是垂直的所以人们能够观测到传播到地下的波场和地下各个反射界面形成的反射,可观测到有意义的层位入射的地震波,也可观测到最终反射和透射的波形,还可观测到震源波形及其通过地层的演变。可以追踪向上的反射波,直到地表附近,研究它穿过介质时波形受到的畸变,反射系数衰减,波形转换,速度及其它岩石特性的信息均可从这些观测资料中求出。

监视记录上往往呈现下行波列的能量远比上行波列的能量要强得多,且包含随机噪声、相干噪音、震源子波的多位性及道间一致性差、地表多次波及层间多次波等给解释人员带来相当大的困难,对目的层的预测产生障碍。为使野外 VSP 资料得到最大限度的利用,尤其是上行一次波进行分析利用的情况下,必须进行多方面处理。

1. 固定深度点迭加

作原始记录质量编辑检查后(单独绘制每个测点处的记录、靠近井底处绘制爆炸信号),从数据组中除去噪声和其它明显的不当的记录,这种编辑方式是主观性的且可重复若干次。

垂直地震剖面通常采用组合激发增加震源能量,然后在每一个检波点进行迭加。地表激发产生体波的能量比炸药震源的能量要小,但为了提高 VSP 资料的信噪比,常用地表震源在不同时间内激发的单次地震记录进行迭加。为了抑制假同相轴及其噪声,通常在一个固定检波器点进行多道记录,然后进行迭加处理输出最终记录。可根据信噪比 S/N 要求,在不同的位置、不同的深度叠加不同的次数。若噪声背景是不相关的(即白噪的),将 N 道进行迭加,那么地震信号的信噪比 S/N 的改善接近于 \sqrt{N} ,其中 N 为叠加次数。但若 VSP 子波道间一致性较差,则迭加处理对改善地震信号的信噪比也不会明显。

2. 表层静校正



对每道 VSP 记录必须进行静校正, 以使迭加前排齐同相轴, 要应用炸药激发时, 这种校正尤为重要。一般地表震源要显示出各激发点间很强的相干噪声。

1) 上行反射波和多次波的关系

在图 13 中, 假如 T_A 、 T_B 、 T_C 是反射层 A、B 产生的单程旅行时和检波器的初至, 则反射波 A、B 和多次波 M 的旅行时分别为:

$$t_A = T_A + (T_A - T_C) = 2T_A - T_C$$

$$t_B = T_B + (T_B - T_C) = 2T_B - T_C$$

$$t_M = T_A + 3(T_A - T_B) + (T_B - T_C)$$

$$= 2T_A + 2(T_A - T_B) - T_C$$

上述关系式满足: “上行同相轴 “N” 的旅行时间 = 地表双程旅行时 - 检波点单程时”

2) 下行波和多次波的传播路径关系

假定界面水平, 用小偏移距激发, 则检波器接收的下行波的初至时间分别为:

$$t_A' = 2T_A + T_C$$

$$t_B' = 2T_B + T_C$$

$$t_M' = T_A + (T_A - T_B) + (T_C - T_B)$$

$$= 2(T_A - T_B) + T_C$$

上述表达式表示: “下行同相轴 “K” 的旅行时间 = 同相轴 “K” 在界面上双程旅行时间 + 直达波单程旅行时”, 由上面两个方程可知: 只要将同相轴的时间移动 T_C 或 $-T_C$, 则可得到与地面地震资料进行对比的时间剖面。 T_C 是检波点 G 记录到的初至波时间, 用相应的初至波到达时对 VSP 所有道资料进行时移 ($+T_C$), 则 VSP 反射资料就可与地面地震记录对应起来。而对应由下部界面反射到地表并再由地表反射回去的下行波的旅行时则相当于该界面双程旅行时滞后的时间即方程两边 $-T_C$ 。

3. 炮点静校正

在 VSP 测量过程中, 使用震源的深度可能会有很大变动, 井壁塌陷、井软都会导致采用不同的震源深度, 或者利用不同的井孔。若改变震源—接收器的几何排列, 可能造成记录初至时间发生变化。设 L 是炮点距离井中心的偏移距离, d_i 为第 i 个炮点位置的炮点深度, T_i 为直达波上第 i 个炮点位置到井中检波器的时间, H 为井中检波器的深度 (图 14)。

设炮点 1 为参考炮点, 可将所有炮点校正到这个参考炮点上。由第 i 个炮点到井中检波器的直达波时间为: $T_i = \sqrt{L^2 + (H - d_i)^2} / v$, 式中 v 为到检波器的平均速度。炮点 2 的校正时间是 (当 $d_2 = d_1 + \Delta d$ 时),

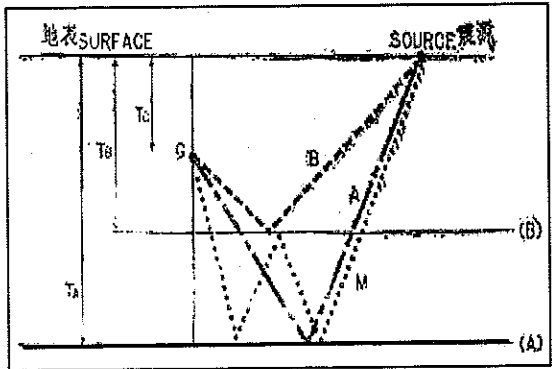


图 13 水平层状介质中上行波和多次波的关系图

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1 \left[\sqrt{1 + \Delta d(\Delta d - 2H + 2d_1) / [L^2 + (H - d_1)^2]} - 1 \right] \quad (1)$$

本方程(1)可用于炮点静校正,用于浅井中检波器的位置。

如果 $H \geq L$ 和 $H > d_1$, 则泰勒级数展开式:

$$\Delta T \approx -\Delta d/V, \quad (2)$$

同时当 $L=0$ 时, $\Delta T = -d/V$, 本方程(2)忽略了射线的所有水平分量,适用于深井中检波器位置。

当 $L=0$ 时,公式可用于两个震源下面产生的直达波和一次反射波。而能量从地面首先反射的“虚反射”初至和虚反射波都要作相反的校正,二者的校正不能在一个记录上同时完成。因为虚反射是不需要的,所以静校正叠加使虚反射受到严重破坏。若在作静校正以前的叠加资料应用了虚反射波,则虚反射的影响会处理得好些。不管在任何情况下,只要将震源深度变化保持在最小限度,便能得到最好的结果。地表震源的优点是炮点静校正量比较小,甚至可以忽略。

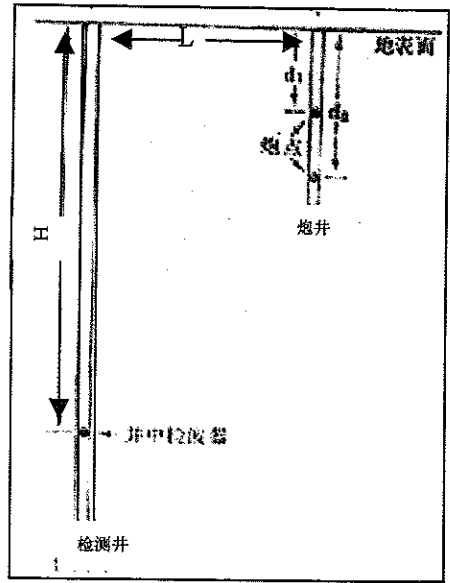


图 14 炮点静校正示意图

4. 频率分析与带通滤波

为了确定信号、相干噪声和随机噪声的频带,需要进行频谱分析。使用带通滤波可以得到额外的信噪比改善,它可压制两种重要的噪声源,井筒波噪声(相干噪声)和随机背景噪声。井筒相干噪声的频带位于信号频带的外边或部分位于外边,所以带通滤波在压制井筒噪声方面确为有效,为了压制井筒噪声和随机噪声,最好的办法是设计只让信号频带通过的滤波器。经过带通滤波的 VSP 资料能看到井筒波的噪声序列,其振幅比原来的下行地震体波振幅强得多,主频也比体波的频率高,带通滤波(2/12—86/100Hz)显然能改善信号相干噪声比。

5. 垂直迭加

一般提取上行波、消除下行波的数字处理程序是在一张经过预处理的记录上,将上行反射波校正,使下行波同相轴更加倾斜,然后作垂直迭加,由于下行波列是异相迭加故损失了少量的信息。垂直迭加不仅拉平了一次反射波,也拉平了多次反射波,所以其迭加道中不仅包含了一次反射波,也包含了多次反射波,只有通过反褶积才能较好地消除多次波。但垂直迭加可把一次反射波和多次反射波校正成地表接收的双程旅行时。

6. 限域垂直迭加

为了得到仅包含一次反射波的 VSP 垂直迭加资料将上行波同相轴垂直校正,接着再对初至波和一次反射区与多次反射区的分界线之间的波进行垂直

迭加,就得到一张仅包含一次上行波的 VSP 迭加剖面资料。又称此方法为前部走廊迭加技术。

7. 振幅分析处理

若能正确的恢复 VSP 资料地震子波的振幅,则经过数字处理后其波的振幅就可成为地震勘探家有力的解释工具,不仅可以校正 VSP 井附近的地表地震记录的振幅,而且还可进一步提高地表地震资料解释的价值。反射波勘探中的亮点技术就是利用反射波的振幅特征来解释岩性及岩层孔洞充填流体的性质。之所以要对 VSP 资料的振幅进行补偿恢复,是因为有几种物理因素在影响地震波的振幅:球面几何扩散是远源区地震波能量衰减的主要物理因素,另有透射损失、散射和吸收。

地震波振幅随着时间及井中检波器位置的变化而有很大变化。几何扩散、上行反射造成的下行能量的损失、层间多次波的影响和非弹性衰减等所有这些因素都对观测的振幅起着衰减作用。几何扩散和频率无关,只与测定的岩石特性略有关系。所以地质解释之前要消除它的影响。常常需要对非几何方面的影响作某种补偿。为了确定适当的补偿,在每个测点测定初至振幅,利用最小平方法使这些振幅与下列函数拟合

$$ce^{-\alpha R}/R \text{ 或 } cR^n$$

式中 R 是距离震源的距离,或是波至时间, c , n 和 α 均为常数。量值 R 有助于几何扩散的考虑, n 和 α 有助于补偿透射损失和衰减, c 是任意常数或称之为比例因子。因为除扩散外所有的影响都在某种程度上与频率有关, n 和 α 也可能随着资料的频率范围而变化。

确定 VSP 资料增益补偿函数中的困难来自相干的井筒波噪声。因为体波信号振幅衰减特征与井筒波噪声完全不同,有可能在增益补偿资料中造成极大的井筒噪声振幅。近地表交混回响也与振幅分析相干扰,因为交混回响的振幅并不像其它的波那样随着时间以相同的比例衰减。于是在振幅衰减和补偿中存在主观因素,最后的补偿取决于频率、井筒噪声和期望从资料中推导出的信息。

振幅分析同时能检验爆炸子波整形滤波完成得是否妥当。可以确信实质性的振幅偏差并不是地质条件引起的,而是炮点波形变化所造成的。这种振幅分析也表明振幅分析在 VSP 资料研究地震波场的特点时,爆炸子波整形滤波器的应用是极端重要的。

8. 震源与检波器的方向性

如果 VSP 震源在一个方向的激发能量强,而在另一个方向的激发能量弱,那么井中检波器接收到的振幅应该纯粹是由震源方向性引起的,与地下岩石的物理性质无关;同样井中检波器也有方向性。

在均匀介质中,地震波以相同的幅度在各个方向传播,井中动圈式检波器垂直分量响应的比例因子应为 $\sin\varphi$, 而 $\varphi = \tan^{-1}(z/h)$, 其中 h 是井口到

震源的偏移距, z 是检波器井中深度。

地震波衰减的各个物理过程中, 球面扩散衰比其它衰减之和还大, 所以恢复 VSP 真振幅的计算方法中的关键是确定球面扩散衰减的数学函数。然后利用它的反函数来放大 VSP 记录中各道的数据, 这就相当于地震子波在单一地层剖面中以平面波前传播。

在均匀介质中当地震波前以球面扩散的方式传播时, 则初至波的振幅与 $1/L$ 或 $1/V \cdot T$ 成正比, 其中 L 是地震波的传播距离, V 是地震波的传播速度, T 是地震波的传播时间。它指示这种衰减在呈连续扩散的球面上, 能量分布不变, 然而实际上这种均匀地层不存在。

事实上, 地震波在各种不同的速度、密度的岩层组合的地层结构中传播时, 地震波的折射往往使其传播路径增加, 且由球面扩散表示的振幅衰减 D 可写成如下的表达式:

$$D = V_0 / \{ [V_{RMS}(T)]^2 \}.$$

其中 V_{RMS} 是旅行时 T 内的均匀方根速度, V_0 是以速度为单位的常数, T 的单位是长度⁻¹。如果地震波初始振幅的最大值为 A_0 , 当只考虑球面扩散的影响时, 在深度 Z 处的最大振幅值应为:

$$A(Z) = A_0 D(Z)$$

针对层状介质中纵波振幅的衰减值为:

$$D_c(Z_c) = V_{0c} / \{ [V_{RMS}(Z_c)]^2 T_c(Z_c) \},$$

式中下标 C 表示纵波速度传播情况。

通过同一地层剖面并在深度为 Z_c 处接收横波, 那么横波振幅的衰减值为:

$$D_s(Z_c) = V_{0s} / \{ [V_{RMS}(Z_c)]^2 T_s(Z_c) \},$$

式中下标 S 表示纵波速度传播情况。

若井内岩层纵横波的速度和时间关系分别为:

$$V_{RMS}(Z_c)_c = 2 V_{RMS}(Z_c)_s$$

$$T_c(Z_c) = 0.5 T_s(Z_c)$$

由此可知纵横波球面扩散的振幅衰减值存在如下关系:

$$D_c(Z_c) = V_{0c} / (2 V_{0s}) D_s(Z_c),$$

常数 V_{0c} 、 V_{0s} 分别表示第一层的纵、横波速度, 下标 0 表示层序。设置第一个地层层序时, 要有准确的速度判定并要有一个必要的标准。由本方程可得出如下结论: 横波衰减值是纵波衰减值的两倍。但在浅部松散的地层中, V_{0c} 可能比 V_{0s} 大 3—4 倍或是 5 倍, 这时纵波的球面扩散可能要比横波大得多。所以常从岩石充分坚硬的地方开始处理。



在垂直地震剖面中,为阐明体波球面扩散衰减,均方根速度和旅行时必须认定是深度处的函数,求取上述参数的简便方法大致可有两种:1)任一点处均方根速度和单程旅行时能够方便的由声波测井曲线求取。2)任一点处均方根速度和单程旅行时可以应用 VSP 资料的初至时间求取。由声波测井曲线和 VSP 纵波初至计算出来的纵波由几何扩散引起的振幅衰

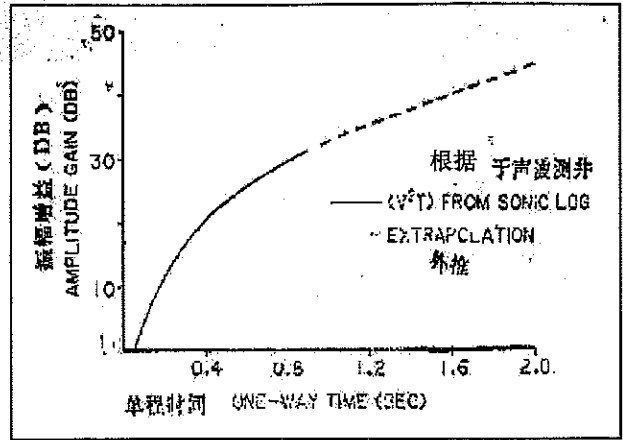


图 15 振幅的恢复增益函数曲线

减函数是 $T \cdot V_{RMS}^2$ (图 15), 由于振幅衰减是在时间域内进行的, 所以这个函数图是以单程旅行时而不是深度为变量。VSP 资料振幅的恢复增益函数是 $1/T \cdot V_{RMS}^2$ 即 $(T \cdot V_{RMS}^2)^{-1}$ 。

VSP 资料与地面地震资料的主要差别是, VSP 资料既不是单程旅行时, 又不是双程旅行时。地面地震资料记录的都是双程反射时, 若将井中某一深度点处记录的初至波时间作为单程旅行时, 那么同一深度点处记录的上行一次反射波 (非层间多次反射波) 的时间比单程旅行时要大而比双程反射时又要小。二者旅行时的差别允许我们应用与常规地面资料处理时不同的增益。

$D(Z_r)$ 表示在水平反射层内 Z_r 处的下行波的球面扩散衰减, 在深度 Z_0 处记录到的由地表到 Z_r 界面产生的一次反射波的球面扩散, 其经过地层衰减的表达式为:

$$D = 2D(Z_r) / D(Z_0),$$

D 表示井下观测到的反射波的球面扩散, $2D(Z_r)$ 表示从地面到反射界面再返回地面的双程路径球面扩散, $D(Z_0)$ 表示从地面到观测点 Z_0 处的单程球面扩散。

振幅增益恢复方法是在深度 Z_0 处记录到的上行波 (反射深度为 Z_r) 和下行波初至旅行时分别为 T_1 和 T_0 , 则到达反射界面的单程旅行时 T_r 可用下面方程表示:

$$T_r = 0.5(T_1 + T_0),$$

这个关系式仅对水平反射界面有效。对于任意的 VSP 道, 恢复球面扩散衰减的增益函数 $g(T)$ 可以写成:

$$g(T) = G(T) \quad 0 \leq T \leq T_0$$

$$g(T) = 2G[(T + T_0)/2] / G(T_0) \quad T_0 \leq T \leq T_{MAX}$$

其中 $G(T)$ 是给出的增益函数, T_0 是 VSP 道的初至波的到达时, T_{MAX} 是总的记录时间。若 $G(T)$ 用分贝 dB 表示, 乘以因子 2 应该作为增益增加了 6。



运用此公式消除了球面扩散影响之后，下行初至纵波的振幅随着深度增加而降低。

在大多数 VSP 井中如果没有高质量的声波测井资料和 VSP 初至波资料时，那么若要精确计算增益函数就该使用下面函数：

$$g(T) = At^n \quad 1.0 \leq n \leq 2.0$$

该公式为横波和纵波的振幅恢复球面扩散增益提供了一个相当好的公式，但必须正确选择 n 值。上述结论基于水平界面，当界面为倾斜界面时可用层速度得到球面扩散。

9. 选择波相压制

因为 VSP 资料中包含着相互干涉的上行波和下行波，而上行波类似于地面地震勘探中记录的信息，所以 VSP 资料中对上行波的分析是很重要的。从振幅分析可知上行波的振幅比下行波要弱得多，所以提取上行波比较复杂。

在垂直地震剖面上记录的波是由下行波列和上行波列叠加组成的。为了鉴别反射波，需要分离上行波和下行波。最佳多道速度滤波是实现这一目的的有效方法。它是利用一组相邻记录或地震道上相干波的视速度来区分期望的波（具有指定视速度的相干波）和不需要的波（不相干波和带有“错误的”视速度的相干波）。

在垂直地震剖面解释中，为达到增强某些同相轴并精确研究某些弱同相轴波相时，要求选择波相压制技术，为消除地震记录中不需要的波相大多采用了速度滤波数字处理方法，由于速度本身是个矢量，所以 VSP 地震波传播速度存在两方面差异：一是传播方向不同，二是速度值不同。利用地震波的这两种性质就可能消除无用的波相。其方法有两种，分述如下：

1) 频率—波数 ($f-k$) 域速度滤波器。其设计 requirements 是 VSP 资料要以固定增量记录，时间和空间采样间隔必须满足奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理，即在一个周期内或最短地震波长上至少要有两个采样点。

地震波的速度特性在空间—时间域 ($Z-T$) 和频率—波数域 ($f-k$) 的基本关系 (图 16) 是利用正、逆傅立叶变换之间的关系可完成 VSP 资料在两种数学域中的变换。经过傅立叶变换后可将 VSP 资料分离到两个不同的半平面上 ($f-k$ 域)，而在空间—时间 ($Z-T$) 域中，假如采样正确，则上行波和下行波总是干涉在一起。所以 $f-k$ 域中为消除下行波提取上行波提供了一种方便的方法。

如果 VSP 资料中包含了来自一个方向上的二种波型而且必须衰减掉一个波时，则除了应用其速度的矢量性外，还必须应用上面的第二个性性质即量值性才能设计出一种在频率—波数域中压制不需要的波的滤波器。在 $f-k$ 域中将 VSP 资料乘以一个衰减因子 (0.001—0.01)，这时除了纵波外其它波全部被衰减掉了，然后进行反付立叶变换即得到分离的上行波。

付立叶变换对的重要特征是：在一个域内的窄函数变换到另一个域中就是宽函数。如时间域中的尖脉冲变换到频率域中就是一条直线，频率域中的尖脉冲变换到时间域中就是单一无限延长的正弦或余弦波。容易产生的空间假频现象，也可认为是沿着同一速度趋势传播的上行波资料的算术平均值，地震资料的这种由速度滤波引起的空间假频现象通常叫做里伯混频。

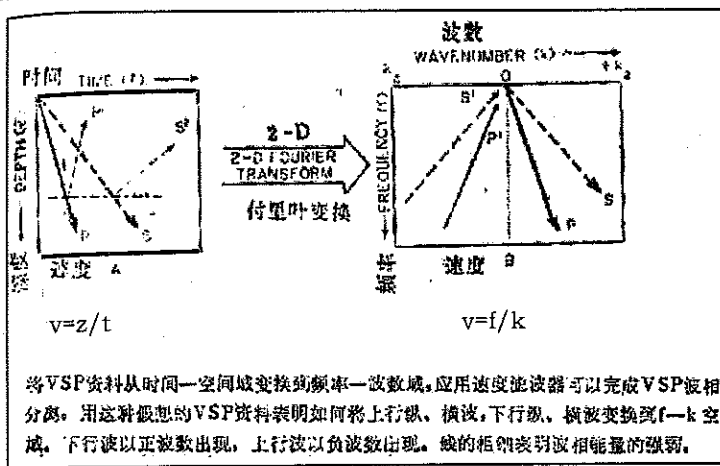


图 16 空间—时间域 (Z-T) 和频率—波数域 (f-k) 的基本关系

尖脉冲变换到时间域中就是单一无限延长的正弦或余弦波。容易产生的空间假频现象，也可认为是沿着同一速度趋势传播的上行波资料的算术平均值，地震资料的这种由速度滤波引起的空间假频现象通常叫做里伯混频。

2) 运用中值滤波技术

在消除 VSP 记录中的某种波相后，再与原始资料相减就可得到另一种波相。中值滤波是一种平滑数据并保留断层的研究工具。中值滤波器是非线性的，处理 VSP 资料时必须先做线性算子，然后再进行中值滤波。中值滤波的两个重要性质是：

- (1) 中值滤波器可绝对消除尖峰干扰；
 - (2) 中值滤波器能让阶跃函数通过；
- 设计检波器—震源观测系统，应该有利于井中检波器记录断层的信息。可讨论固定震源—检波器的模拟计算方法。沿着深度方向作中值滤波处理 VSP 资料可完成两个任务：在满足地震子波的道间一致性较好的前提下，
- (1) 几乎衰减掉全部上行波；
 - (2) 平滑并加强下行波；

从整个波场分离出上行波和下行波之后，即可鉴别一次反射波，将它放置于原点并观察反射波在地表出现时如何变化，同时也可分析下行波随时间和深度如何变化。

10. 根据 VSP 下行波设计反褶积算子

由震源向下传播的下行波既不是一个脉冲，也不是一个简单的子波，而是一个复杂的波列，夹在近地表的震源能量的交混回响是造成这种波列的根本原因。这个波列包括起始向下的脉冲、来自风化层底部的反射波和代表地面的反射波。因而记录的反射波包含诸波列的扰频混合，而不是来自每一层的一列离散的脉冲。假如原始下行波波列是单一短脉冲，如果短脉冲是单个的正振幅或“尖脉冲”，该方法叫作尖脉冲反褶积，其关键的一步是精确计算和估计在每一个测点记录的自相关。可以适当选择算子的长度及延迟，使算子得到某种程度的最优化。下行波在进入地层时变得较长且更为复杂，因为每个连续地层自身产生的交混回响都对通过地层的波起作用。利用上述的

反褶积计算一组数据，即在假设的每个深度点上进行反褶积，下行波列是一个尖脉冲或短脉冲的情况下，对已有的记录进行估算，这个方法叫作下行波列反褶积。

垂直地震剖面的反褶积是按照下列步骤进行的（图 17），通过空间滤波增强下行波，在每个深度点上的增强下行波 $D(Z_i)$ 就作为该深度的地震信号（包括单个震源波形）使用。该信号能设计一个用于 $D(Z_i)$ 时可提供零相位带通波形的滤波器。当用于上行波 $U(Z_i)$ 时，该滤波器将压缩震源波形、衰减多次波并使检波器响应规一化。反褶积后可确定包括极性在内的相位特性，输出是 RC_0 与零相位带通子波褶积估计结果。

从 VSP 中提取的反褶积算子既满意地消除了直达波之后的下行多次波，又可使 VSP 直达波变成更好的波形。应用它可以确定井口附近地面地震资料中的一次反射波和多次反射波，显然是很有用的解释工具。这种反褶积值得感兴趣的是它可衰减有一定延时又并不太长的多次波，因而当整个剖面被多次波干涉时，可用它来研究多次波组。经过反褶积后的上行波 VSP 资料是该井附近地面地震资料最直观的对比资料，插入到常规地震剖面中可方便地解释地面地震资料。

地表检波器不能区别来自地下的地表多次波和一次反射波，然而在垂直地震剖面中却可以接收到视速度符号相反的两个波组。根据视速度的差异则完全可以将 VSP 资料中的上、下行波分离出来。从 VSP 资料中提取的下行波不仅能够帮助设计反褶积算子，而且可用它消除上行波中的多次波。为进一步压制反褶积垂直地震剖面中的多次波和噪声，可沿着初至波和一次反射区与多次反射区的分界线这一条带之间的波进行垂直迭加，通常称此狭长带为走廊，它通常具有最高的信噪比，而且没有多次波。沿着这个狭长带垂直地震剖面处理能够最佳地恢复振幅、相位和频谱。通过对垂直地震剖面反褶积、叠加相邻深度点记录、并校正成双程反射时间后，可从该区提取一记录道（VET），该道是有限带宽的反射系数的最佳估计，且可与合成地震记录道对比得很好。应用下行波设计反褶积算子比从普通地面地震波中确定的反褶积算子的幅度要高 20dB 到 40dB，因为它是以 VSP 井附近地层剖面为基础，忽略可能存在的多次波和噪声影响。反褶积算子不仅要消除上行多次波，而且要消除下行多次波，其基础是利用上行波与多次波的时间差。

11. 炮点子波整形

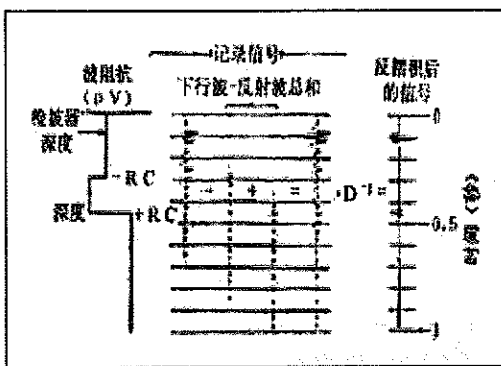


图 17 VSP 中反褶积工作原理图

如果每一炮产生的子波都相同会大大提高 VSP 资料的解释价值, 因为它可确信地震子波的变化完全是由地下地质体引起的而并非人为造成的, 因此野外施工人员最关心如何使震源保持其物理环境的一致性和整个 VSP 采集中震源和地层耦合环境的一致性, 以及震源激发能量的一致性。实际上野外操作过程中, 子波总会有变化, 为此必须把震源子波转换成标准形式即是子波处理, 为此要求必须把近场源的传播子波记录下来。任意选择一个震源监视波形的记录, 称之为标准子波, 或叫标准爆炸波形。检验对应于每张记录的监视波形, 再设计一个单独的滤波器, 将每个单独的监视记录波形转换成标准的子波。这个滤波器用于所有的井下记录, 所得的结果被认为是在每个炮点的地震震源都相同的状况下得到的记录 (图 18)。

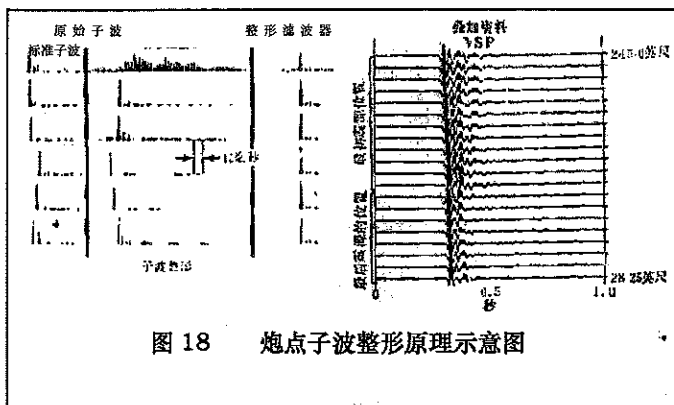


图 18 炮点子波整形原理示意图

设 $P_s(t)$ 标准子波, $P_i(t)$ 是用特定炮点的监视记录的单独的炮点波形, 利用最小平方整形法计算一个滤波器 $f(t)$, 将 $P_i(t)$ 转换成 $P_s(t)$ 。还必须选择两个滤波参数: 滤波长度、滤波延迟, 这两个数据一般利用完整数据集的采样, 通过逐次逼近法选择, 一旦选出参数, 则对所有资料都用相同的滤波长度和延迟量。

12. 水平叠加

偏移井中某一深度处的检波器记录的反射点在地面上的投影位置随着记录时间的增加即反射深度的增加而向远离井口的方向移动。计算反射时间的垂直比例及反射点在水平面上的偏移距离是进行 VSP 水平叠加的基础。基本依赖于正常时差校正, 并将其应用到所有观测深度点的记录中。利用整个井段内的所有 VSP 资料可得到从震源到井口的偏移距离的二分之一段内的水平叠加资料。

在多道速度滤波与下行波作反褶积后, 要用垂直叠加进一步改善信噪比 S/N 的比值。为实现垂向数据叠加, 要求将两个或多个邻近测点的数据进行时移, 对齐相干波列, 再把这些记录相加, 以适当的方式增强相干波, 相当于作附加的速度滤波。可使用两种叠加: “局部”垂直叠加和“时间-加权”垂直叠加或“累加求和”。

当 N 是奇数时, 可用下列公式定义局部垂直混波:



$$\bar{S}_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{i+k}(t) f_i(t)$$

式中 N 是混波的道数, $S_i(t)$ 是在第 i 个深度测点上的输入, $\bar{S}_j(t)$ 是第 j 个深度测点的输出, $k = j - 1/2(N+1)$, $f_i(t)$ 是滤波函数。

若 $f_i(t) = \delta(t)$, $\delta(t)$ 是 δ 函数时, 局部混波正好是输入的平均。 $f_i(t)$ 和 N 的选择取决于信噪比 S/N 的局部变化、相关程度、频率成份、预计的空间分辨率。

同样可用下列公式定义计算累加求和

$$\bar{\bar{S}}_j(t) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j S_i(t) A_j(t)$$

式中 $\bar{\bar{S}}_j(t)$ 是在第 j 个深度点的累加道求和, $S_i(t)$ 是在第 i 个深度测点处的输入, $A_j(t)$ 是一个函数, 在求和对同相轴的数目进行补偿, 它将平衡输出的幅度。

用累加求和法处理过的上行波数据集可使在地下深处振幅很小的反射波得到很大的加强。这样可大大改善资料的信噪比 S/N 。能够有效地把地表反射资料和 VSP 资料联系起来。但它不能表示向上运动的反射波波形的变化, 由于实现累加求和跨越的距离太大, 使深度分辨率受到严重影响, 所以这是一种折衷方案。

13. 传递函数

可用输入的子波与某个同介质的反射系数有关系的函数相褶积, 再加上测定的噪声来计算一张地震记录。从数学术语上, 这种计算可用下面的方程来描述:

$$S(t) = W(t) * f[R(t)] + N(t)$$

式中, $S(t)$ 是地震波形图, $W(t)$ 是输入子波, $N(t)$ 测定的并假定为不相关随机分布的噪声。 $R(t)$ 是反射系数, $*$ 是褶积符号。

在地震资料解释中, 传递函数是一个非常重要的概念, 因为使用它可避免对某一已知的地层剖面做波场和岩石之间相互影响的、错综复杂的关系进行详细分析。有时难免把注意力集中在地层剖面 (可作为一个大地地层对待), 将地震波“输入”转变成地震波“输出”的情形, 所以传递函数可完全描述岩石的全部声学特征。

在平面层状介质和法线入射的平面纵波情况下, 有两个输出和两个传递函数。若将输入作为是进入层顶部的波列, 则一个输出是相当于上行反射波列, 另一个输出是层的底部发射的合成波列。在这两个函数中, 第一个波列与反射波列有关, 第二个传递函数与透射波列有关。由于在按照时间序列进



行褶积和按时间序列进行傅氏变换作乘法之间的二重性，传递函数的傅氏变换包含了与相应的传递函数本身相同的岩石层的信息。在某些情况下，岩石传递函数的傅氏变换振幅谱或许比时间域表示能更好地反映它的特征。变换函数分析中常用傅氏变换或频率域方法。

用下列式定义岩石序列 $T(t)$ 的传递函数

$$O(t) = T(t) * I(t) + N(t)$$

$O(t)$ 是输出， $T(t)$ 是传递函数， $I(t)$ 是输入， $N(t)$ 是测定的并假定为不相关随机分布的噪声。

在这种情况下，把下行波视为线性系统的输入，相应的上行波或反射波作为线性系统的输出。

(1) 下行波

设输入 $D_1(t)$ 是测点 1 的下行波，输出 $D_2(t)$ 是测点 2 的下行波，测点 2 比测点 1 深。取 $D_1(t)$ 和 $D_2(t)$ 作傅氏变换，下式可估计出频率域中的传递函数。

$$\bar{T}(\omega) = \frac{\bar{D}_2(\omega)}{\bar{D}_1(\omega)}$$

式中 $\bar{T}(\omega)$ ， $\bar{D}_1(\omega)$ 和 $\bar{D}_2(\omega)$ 分别是 $T(t)$ ， $D_1(t)$ ， $D_2(t)$ 傅氏变换。这个谱之比将揭示视衰减，即在介质中内部反射和其它机制的非弹性衰减的结果。

(2) 上行波和下行波

可有两种方法：整形滤波方法和卡尔曼滤波方法。

① 整形滤波方法

设 $D(t)$ 是第 i 个井下检波器位置的下行波， $U(t)$ 是在同一位置的上行波，可导出维纳整形滤波器 $T(t)$ 。

$$D(t) * T(t) = U(t)$$

或者在频率域中，

$$\bar{T}(\omega) = \frac{\bar{U}(\omega)}{\bar{D}(\omega)}$$

如果 $D(t) = \delta(t)$ ，则 $\bar{T}(\omega) = \bar{U}(\omega)$ 。传递函数 $T(t)$ 是相应震源产生的反射地震记录，其前提条件为介质是均匀半空间的，就是说 $T(t)$ 是在第 i 个测点以下介质的传递函数。

② 卡尔曼滤波方法



它估算传递函数的主要思想是根据地震记录估算一个不相关的白噪声序列,使反射地震记录合理地满足不相关白噪声序列的要求,这里将传递函数作为不相关的白噪声序列。其估算步骤是:第一,用一个下行波推导出具有理想输出卡尔曼滤波估算 $e^{-\alpha t} \sin(\omega_E t)$ 的整形滤波器。第二,将此整形滤波器应用于相应的上行波。第三,利用门德尔和笠迈罗描述的卡尔曼估算方法。

反射波通过介质后出现的视高频损失,可证实在于介质中下行波向下传播时所观测到的高频损失,同时说明要估算介质可靠的声学特性(如波阻抗),应当采用时变滤波的方案。

14. 声阻抗测井估算

地震资料处理的最终目的是估算作为深度函数的地层声阻抗,也就是由地震反射初至作出一条声阻抗曲线。

根据 VSP 资料进行声阻抗计算比根据常规地震勘探反射资料更容易、更精确,因为它能精确地了解地震勘探震源,并且能在有意义的反射层序附近测定反射波场。产生声阻抗计算的方式为:1)产生反射传递系数;2)假定每个优势“波”(波峰或波谷)在此传递函数中对应于波阻抗的变化。3)假定一适当的起始波阻抗,根据每个优势波的振幅计算波阻抗的变化。4)将每个阻抗变化值都加在前面的波阻抗值上,得到一个新的波阻抗值。

结果高频特点和低频趋势在合成波阻抗函数中已经失去,不过在计算的和实际的声波测井曲线上,占优势的局部波阻抗变化是相符合的。

15. 偏移

地层倾斜时在对 VSP 资料进行水平叠加时就必须进行叠前或者叠后的偏移处理,以便使来自地下的反射层归位于真正的空间位置。

反射层面的倾斜带来了反射波时深曲线的向左或向右弯曲,地层倾斜度和厚度的不同,那么反射波的曲率也不同,随着反射界面深度的增加,则对应的反射波同相轴的曲率减小。

利用 VSP 反射资料进行空间归位的最大优点是 VSP 反射波总是在下行波初至上开始分离,即反射波虽然偏离了,但反射波的始点必定是不偏移的。而当偏移地面地震资料时没有这种控制点。所有入射点外的其它各点和上行反射波必须沿着它们的轨迹进行正常时差校正。

16. 最大相关滤波

如果记录井内地层具有小倾角或记录井靠近地下绕射体时,则上行波中就会包含各种传播速度的波形。倾斜界面上反射波很弱,难以识别追踪,可绕射波能量又很强,因而常常会淹没其它地质特征。为进一步完善资料的严密性,根据垂直传播速度的不同来分离这些同相轴,这些经过速度滤波的有效波振幅比原始资料的振幅高得多的资料重新组合成单一波型的 VSP 资料,这一方法的基础就是最大相关滤波。其步骤为:1)用 $f-k$ 滤波器从下行波场中分离出上行反射波,衰减掉 $f-k$ 右半平面上所有数据,同样在上、下



行滤波技术中也可应用中值滤波技术；2) 在分离出的下行波中再应用多道速度滤波器进一步分离，以消除窄速度带以外的干扰波，这个窄速带的中心是：

$$V = \Delta Z / \Delta T,$$

ΔZ 为两个 VSP 道间垂直距离，时间间隔 ΔT 选择为： $\pm \Delta t, \pm 2\Delta t, \pm 3\Delta t, \dots, \pm N\Delta t$ 。

17. 空白带资料内插与外推

VSP 资料变成空白录制不全原因：存在不良耦合的多层套管；存在未固结或固结不好的单层套管；存在井孔变径而检波器与地层不能很好耦合；这些现象会影响 VSP 资料的数字处理，为改善包括空间滤波在内的数字处理效果，为准确描述井孔地层剖面透射和反射子波的特性，因此需要对这些空白带的资料进行内插和外推。可根据相邻道的渐近线来进行内插，同时还要根据反射波的极性来校正地震波的振幅。内插和外推纯粹属于一种人为的资料装饰手段，但确实资料面貌不全时仅根据有限记录道来进行包括数字滤波在内的数字处理时，由于边道的贴边效应收敛也会扩大其空白区。但必须注意两个关键问题：一是上行反射波在地面或其它波阻抗界面上能够产生下行波；同样所有下行波也都能在波阻抗界面上产生上行反射波。

建立如图 19 所示的三层地层模型，其波阻抗分别为 $v_1 \rho_1, v_2 \rho_2, v_3 \rho_3$ 。A 是最浅的检波器，B 是最深的检波器，有 I_1, I_2, I_3 三个界面，分别位于最浅检波器之上，最浅和最深检波器之间，最深检波器之下，反射波是垂直入射，即 $\theta = 0$ 。地面以上各个反射层为地面以下地层的镜像，若进行极性反转，所有地面反射多次下行波和到达地面的上行波的延续波完全一样。即如果在不同深度记录到的地面反射下行波被投影回地面并进行极性反转，则这些波就和在地面产生此下行波的上行波相同。

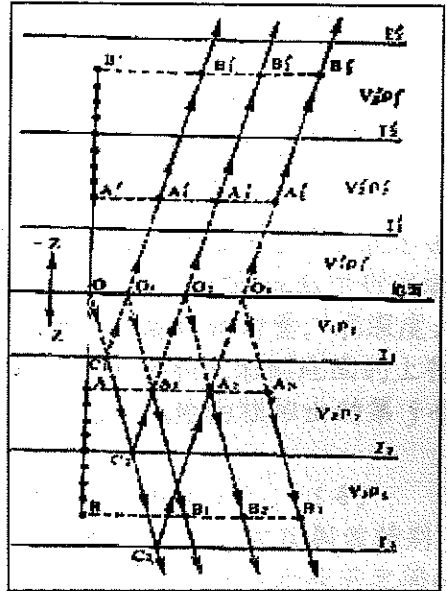


图 19 三层模型的折叠介质

在地面和每个检波器之间的旅行时 τ_i 可从 VSP 上得到。如果在第 i 个检波器上记录到的地面反射下行波中减去 τ_i ，所得到的旅行时就相当于把下行波投射回地面，即每道上的下行波都在同一时间出现。如果在第 i 个检波器上记录的上行波上都加上 τ_i ，则相当于把上行波投射到地面。令

$$D_i(t) = f_i(t + \tau) \quad (1)$$

$$\text{和 } U_i(t) = f_i(t - \tau) \quad (2)$$



如果所有补偿做得完善, 则可知在每一个 $D_i(t)$ 道上出现的直达波和与地面有关的多次下行波将具有相同的时间延迟和振幅。而且在 $U_i(t)$ 上的一次反射和在极性反转的 $D_i(t)$ 上出现的由此一次反射产生的地面多次下行波将具有相同的时间延迟。

假设希望模拟出在地面和最浅检波器之间漏失的 VSP 数据。从地面到最浅检波器之间的旅行时 τ_i 为已知。假设在这一段放置 k 个检波器, 且是按照等时间间隔 $\Delta \tau = \tau_i/k$ 布设测点, 而不是等深度间隔排列的。平均下行波可定义为:

$$D(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i(t) \quad (3)$$

在此平均过程中所有下行波是同相相加, 而所有上行波都是非同相相加。所以希望得到的下行波加强了, 而不需要的上行波和随机噪声受到了衰减。因此如果 n 值不是很小, 用 $D(t)$ 可非常好地估计出地面反射下行波场。要使所有记录上都没有出现层间多次下行波, 虽然也同样被加强, 但其振幅会相对变弱。

在地面除直达波外, 上行波和下行波是一一对应的。令 $-d(t)$ 表示去掉了直达下行波并进行了极性反转的 $D(t)$ 。由于 $D(t)$ 是地面下行波场的估计量, $-d(t)$ 就可被认为是到达地面的上行波场的估计量。在深度为 $(j\Delta \tau)$ 处的 VSP 记录, 可以简单地视为是下行波场和投影到地面的上行波场减去或加上一个 j 的时间延迟量后叠加。因此, 从地面模拟出的第 j 个测点规一化的 VSP 记录可表示为:

$$S_j(t) = D(t - j\Delta \tau) - d(t + j\Delta \tau) \quad (4)$$

本方程对模拟位于最浅检波器之上的界面所反射回的漏失一次反射波特别有用处。但该方程对模拟规一化波场是基于假设在最浅检波器和地面之间的介质速度是均匀的, 若其间有非均匀速度和密度地层的存在, 则它可改写为:

$$S_j(t) = D(t - j\Delta \tau) - p_j d(t + j\Delta \tau) \quad (5)$$

此处 p_j 是第 j 个点的上行波校正因子。一般不可能得到精确的 p_j 值, 可是若能满足某些假设, 就可知道它接近于 1。(52 届 SEG 年会专题文献分析结论为: $1/p_j$ 一般小于 1, 或 p_j 大于 1。)

也可以用下列公式定义的平均上行波场来模拟地面和最浅检波器间漏失的数据, 即

$$U(t) = \frac{1}{w(t)} \sum_{i=1}^n U_i(t), \quad (6)$$

式中当 $0 \leq t < 2\tau_1$ 时, $w(t) = 1$, 当 $2\tau_k \geq t \geq 2\tau_{k+1}$ 时, $w(t) = k$; $t \geq -2\tau_n$ 时, $w(t) = n$; $t < 2\tau_1$ 时, $U(t) = 0$ ($k=1, 2, 3, \dots, n-1$)。



从统计观点来分析只有当 $t > 2\tau_n$ 时, $U(t)$ 才有实际意义。所以必须用极性反转下行波 $-d(t)$ 来代替完全漏失的数据或从统计的观点来讲在 $U(t)$ 中没有实际意义部分(即当 $0 \leq t < 2\tau_n$ 时)。此式可表示如下:

$$U(t) = w_u(t) U(t) - [1 - w_u(t)] d(t) \quad (7)$$

式中当 $0 \leq t < 2\tau_n$ 时, $w_u(t) = 0$ 。

当 $t > 2\tau_n$ 时, $w_u(t) = 1$ 。在实际应用中, $w_u(t)$ 比较理想的形式为一锥形函数, 它的值接近 $2\tau_n$ 处逐渐从 0 上升到 1, 用它代替 (7) 式中的阶梯函数。用 $u(t)$ 代替方程 (5) 中的表达式 $d(t)$, 可将其改写为:

$$S_j(t) = D(t - j\Delta\tau) - q_j u(t + j\Delta\tau) \quad (8)$$

本方程是适用于模拟在最浅检波器和地面之间漏失的 VSP 数据的方程式, 其中 q_j 是不同于 p_j 的另外一个因子。

大多数 VSP 数据可在时-深平面上用几条斜率不同的直线段来合理逼近旅行时曲线。把等深增量的 VSP 图改绘成等时增量时, 要求重新对数据做空间采样, 使其在时-时平面上旅行时曲线的每一个线段的斜率都和给定的参考斜率相同, 因此当遇到两个相邻点的深度间隔变化或速度变化较大时, 就需要某些形式的空间内插。

一种制做等时 VSP (CTVSP) 的方法将保留所有原始记录道, 对 CTVSP 的参考时间增量可定义为在旅行时曲线上斜率最平缓区间相邻道间的平均旅行时。为了保留原始记录道并使时间增量最接近于参考斜率, 就要在原始道间过大的间隔中加上整数数目的内插道。以满足使每个间隔上的斜率和参考斜率完全相同。但可使时间间隔增量尽量小, 使它们的斜率尽量接近于所期望和固定斜率。如果放弃保留原有的记录道的要求就可能得不到精确的固定斜率。

可有多种方法对 VSP 的记录进行道内插, 其中之一是把经过内插的道分别估算出的上行波和下行波场加在一起。上行和下行波场的估算值可分别用下式表示的移动平均法得出:

$$d_i(t) = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=i-m}^{i+m} D_j(t) \quad (9)$$

$$u_i(t) = \frac{1}{w_i(t)} \sum_{j=i-m}^{i+m} U_j(t) \quad (10)$$

$i = m+1, \dots, n-m$ 。

上述方程中用来计算移动平均值的道数 (NRUN) 是奇数 $2m+1$ 。 $w_i(t)$ 是移动平均数的加权函数。当道数 (NRUN) 是一个合理的大数时, $u_i(t)$ 和 $d_i(t)$ 就成为在第 i 个检波器附近的上行波和下行波的很好的估计值。但 NRUN 要尽量小, 以保持波形的局部特性。

在第 i 和 $i+1$ 道之间内插的上行和下行波场可写成:

$$d_{i,h}(t) = hd_i(t) + (1-h)d_{i+1}(t) \quad (11)$$

$$\text{和 } u_{i,h}(t) = hu_i(t) + (1-h)u_{i+1}(t) \quad (12)$$

其中 h 是 0 和 1 之间的数。

全内插道就是内插的上行波和下行波场的简单求和。即：

$$f_{i,h} = d_{i,h}(t - \tau_{i,h}) + u_{i,h}(t + \tau_{i,h}) \quad (13)$$

其中 $\tau_{i,h} = \tau_i + h(\tau_{i+1} - \tau_i)$ 。公式 (13) 是用来做 VSP 道内插以模拟两个相邻道之间的道。

可见, 处理和解释等时增量的 VSP 数据有一些优点, 对采样足够的数据, 二维数据滤波更加有效。特别易将上行波和下行波分开, 把数据从最浅检波器延伸至地面, 将显示出一次波和与之相关的地面多次波的交点, 这个交点可做为质量控制, 用来证明时间关系是否准确。既保证了二维滤波具有足够的采样并改进其聚焦, 用延伸了的数据组又更容易确定一次波和多次波的关系, 增强了解上行波和下行波的关系, 有助于正确解释一次反射波。由于 VSP 数据外推到地面后相当于地面地震数据, 所以在对比研究地面地震和 VSP 数据中很有作用。

18. 射线追踪技术的模拟论证

简单却又很重要的 VSP 理论可借助于射线追踪模拟来论证。射线追踪是为了研究地震波的反射和透射而建立的一种处理过程, 适用于与地下构造和地层密切相关的地表反射数据的特征, 它可提供计算合成垂直地震剖面的能力。它可解决 VSP 构造和地层模拟两个方面的问题有: 从 VSP 数据中测定反射地层的倾角; 针对给定的震源-反射层-测井观测系统研究 VSP 覆盖范围; 判断断层; 可在 VSP 资料中识别出来断距的下限; 帮助在 VSP 数据中识别角度不整合; 探测靠近钻井特殊地层异常时研究确定频带和时间精度。射线追踪模拟除了能提供 VSP 数据中的构造和地震地层学信息外, 还可以研究 VSP 最佳野外观测系统。

VSP 试验前可提供各种地质模型进行射线追踪来判断观测系统和构造模型的图例、可提供经济预算、确定需要记录多少数据, 才能精确反映地下地质体的异常; 记录时间、记录容量、多少材料消耗; 可进行现场 QC 监测、可检验勘探所期望的目标。

VSP 射线追踪模拟的几个假定:

- 1) 假定地震波的能量是以数学上的直线进行传播;
- 2) 假定任意直线与性质不同的两个岩性界面相交, 其反射和透过程都发生在数学点上;

3) 假定用斯奈尔定律 (描述反射和折射) 所描写的反射线和透射线的方向完全取决于它们离开界面时的点的射线方向, 这个声波阻抗界面与地震射线的交点叫做镜像反射点。实际上地震能量在地层中传播时是以球面扩散波前来实现的, 而且反射和透射也并不都发生在数学点上, 而是在呈圆形或



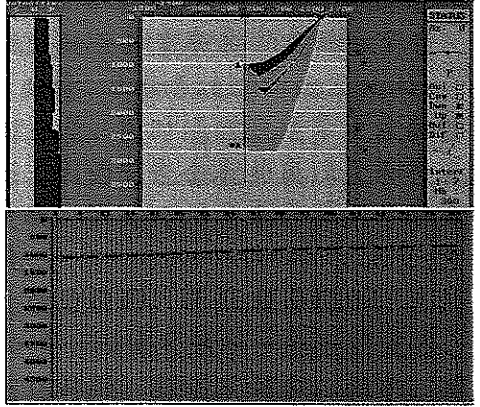
椭圆形的菲涅尔带内发生的。

由 VSP 模型建立和射线追踪可建立的解释规则:

规则 1. 小偏移距时, 若在各个观测深度点处下行直达波和上行反射波呈现出相同的时差, 则反射层具有零倾角; 可用零偏 VSP 资料很容易计算出地层的倾角, 而不管震源位于上倾或下倾方向 (图 20)。

规则 2. 若上行反射同相轴的斜度值大于同一深度点上的下行直达波的斜度值, 则反射层为非水平地层。

规则 3. 随着反射层倾角的增大, 上行反射波的斜度值也增大。当地层倾斜时, 不论上、下倾发炮地下反射覆盖范围存在差别, 反射点的轨迹大都趋向地层的浅部一侧, 且随着倾角的增大而反射点在反射界面上的覆盖范围亦增大。如果 VSP 的勘探



目的层是为了观测距离钻井较远的界面, 以研究获得更多的地层学、构造或岩性等方面的信息, 则上倾布置震源是值得推荐的, 但若为获得靠近钻井的反射信号的最佳道集, 则最好为下倾布置炮点。反射波同相轴曲率的变化, 是 VSP 资料中含有反射层倾角信息的另一个特征。

规则 4. 倾斜反射层的走向不能从一个固定偏移距且是用单分量 (垂直) 检波器记录的 VSP 资料中解释出来。若井中使用三分量检波器的观测系统, 那么倾斜反射层的走向是完全可以三分量的 VSP 资料中检测出来。

射线模型可以验证多大断距能够在 VSP 记录中显示出来, 同时也可研究用什么样的观测系统才是勘探断层的最佳方案。可由两种方法:

1) 使用单一地表震源并固定偏移距, 使井中检波器由地表逐渐加深直到井底;

2) 使用不断改变偏移距的震源, 并将井中检波器固定在某一深度, 即移动垂直地震剖面法;

规则 5. 当采用固定偏移距激发时, 如果反射波同相轴分成几段并在时—深曲线图上出现突变时, 则该反射波很可能是由一个或多个断层组成的反射层。

规则 6: 上行反射波同相轴随着记录深度的减小而逐渐靠拢, 通常反映出角度不整合。当生、储、盖层同时存在时, 一些油、气田多在角度不整合的层内。

规则 7: 用移动式垂直地震剖面勘探角度不整合构造时, 倾斜界面的反射波同相轴会上移。

规则 8: 如果 VSP 资料是在复杂构造或复杂地层中记录的, 那么在三维射线



追踪模拟研究前, 资料解释成果不能完全予以相信。

第三节 处理技术及其关键和系统配置

一. VSP 资料处理的目的

理论上垂直地震剖面 (VSP) 能够得到非常丰富的地下信息: 层速度、反射系数、吸收和衰减、多次波、倾角、确定地面地震数据的反褶积算子、波形转换、同一井中记录 P 波和 S 波的 VSP 分量、P 和 S 波的对比及泊松比。处理目的是将记录的波场分离为上行和下行分量, 同时通过衰减多次波和整形来提高分辨率。感兴趣的主要是上行波场, 因为它包含有井底以上和井底以下的反射界面的资料。下行波场也一样重要, 因为可用它来计算用于衰减多次波、波形整形的反褶积算子和地层速度。

最佳的处理称之为“解释处理”, 边处理边解释, 再处理再解释, 直到获得理想的解释结果为止。在处理阶段, 必须小心使用频率-波数滤波器, 其输出必须要经过检查, 调整子波相位也需这样做。经过反褶积、拉平、频率-波数滤波和带通滤波之后, 将分别对应于上行波和下行波的道集叠加, 这样得到的单个道可以直接与合成记录比较。叠加前必须小心使用切除, 要分析井筒波是否被滤去和是否需要多次波存在。

适用于地面地震资料的面向计算机的数据增强和解释技术都适应于垂直地震剖面资料处理。但由于原始资料有本质的不同, 所以有些处理技术需要做某些改动。

经中国石化股份有限公司河南石油分公司批准, 地质调查处于 2000 年 11 月正式引进法国 CGG 公司的 VSP 资料处理解释软件 GEOVECTEURPLUS 7100。由于 GEOVECTEURPLUS 7100 系统是目前国内外较先进的 VSP 处理软件, 不仅含有丰富的资料处理软件包, 友好的图形操作界面, 而且还有大量的图形显示及图象处理功能, 多窗口的显示功能更加增添了处理的高效性和灵活性。该系统共有两部分构成, 第一部分是交互处理功能, 第二部分是独立顺序处理的程序包。为尽快将科技转化为生产力, 经勘探局审议下达完成 VSP 资料采集·处理·解释一体化的项目研究工作。

二. VSP 资料处理的主要内容与研究

(1) 零偏移距垂直地震剖面数据处理基本原理

在零偏移距 VSP 其震源在井口附近, 检波器沿着垂直方向在井中移动, 地层假设为水平, 所以原则上是一维观测, 只能沿探井柱探测菲涅尔带内的地层变化, 不能了解井旁的构造和地层特征。VSP 资料记录上表现为同相轴的几个主要波组是: 直达波或初至波; 下行多次波(平行于初至波的同相轴); 上行反射波(斜率与初至波相同, 但斜率符号与其相反)和井筒波或瑞雷波。它们的速度依赖于泥浆速度和周围地层的 S 波速度。它们可由井径变化、大的冲蚀带和泥浆密度变化而发生反射, 它们一般在井底也发生反射。其它波



包括 P 波 VSP 上的 SV 波, SH 波 VSP 上的 P 波以及套管波, 这些同相轴在深度-时间域内的 VSP 记录的不同区域互相干涉。根据所研究的频带宽度及是否限于研究记录前部(没有长周期的多次波), 假频问题对 $f-k$ 滤波器作用的限制可以有很大变化。

零偏移距 VSP 资料处理的一个重要步骤是准确地拾取地震波的初至波, 因为其结果是详细准确的速度测量, 上行波和下行波更好排齐, 因而在上行波和下行波拉平对齐之后所有叠加得到的记录有较高的高频成份。最可靠的方法是使用近场源子波。

给定测点 n 的单程旅行时间为:

$$\text{单程时间 } TS_n = [(\text{原始时间})_n - (\text{近场震源子波时间})_n + k] \cos [\tan^{-1} x_n]$$

$\tan^{-1} x_n$ 是铅直线与测点 n 的直达波近似射线的夹角之正切, k 是一个常量,

$$k = [(\text{准确绝对时间})_m - (\text{仪器延迟}) - (\text{原始时间})_m + (\text{近场震源子波时间})_m],$$

m 为井中一个测点。

某些测点上初至波拾取的精度通过与连续速度测井得出的时深曲线进行比较可得出进一步提高。有时 VSP 测点上的初至波噪声严重, 这是因为速度反差很大造成的干涉。与积分连续速度测井比较可以平滑掉这些井眼条件(噪声、冲刷等)造成的异常。

在球面发散校正和标准化(一个道上所有振幅比例于最强振幅)之后, 将 VSP 记录进行显示, 显示结果提供了很好的信噪比概念。第一个 $f-k$ 滤波可用来在假频作用允许的限度内除去泥浆和井筒波。用对应于原始记录时间拾取的静校正把上行反射波拉平, 然后对它滤波和反褶积。

把下行波拉平并滤除, 此时就可得到上行波。然后把上行波拉平, 即从以前计算的下行波剖面校正两倍单程垂直时间。逐道进行整形反褶积, 即除以下行子波, 此下行子波是对下行子波做了 $f-k$ 滤波后确定的。对 $f-k$ 滤波后的结果进行细致解释和研究以便只留下需要的地震波, 主要是上行波、直达波或者 P 波的转换波。

要滤去井筒波可能困难, 因为假频作用(低速度)和井筒波在井内反射时发生振幅的变化, 又因为井筒波的速度和 S 波的速度在感兴趣的地层段内相差不大;

由于井筒波部分地是因扫过井口的地滚波转换的结果, 所以可有两种办法来衰减它: 一种是将泥浆面降低到地面以下, 因为地滚波随着深度的增加衰减很快。另一种是在地表条件有变化时(生产中选择 150m 偏移距), 寻找产生地滚波最弱的震源位置。

最后一步是在适当切除后对道进行叠加, 所得的记录可直接与合成记录对比。VSP 记录只留下初至波后一个很窄时窗之内, 其余部分全部被切除,



这样可把所有长周期多次波都切除掉。若要研究特定的多次波则可用别的切除方式。

VSP 资料计算出的有效反褶积算子, 当用于地面地震数据反褶积时, 可改进地震剖面, 大多数情况下 VSP 叠加道和合成记录之间的 P 波符合良好。

(2) 非零偏移距垂直地震剖面数据处理基本原理

偏移距 VSP (包括斜井和移动震源) 相对于零偏移距 VSP 的主要特征表现在: 偏移距 VSP 是二维观测, 可作出一段地震剖面 (又称局部地震剖面), 用很高的水平分辨率和垂直分辨率给出井旁一段距离的构造和岩性变化。由于其震源布设灵活, 便于利用透射波的动力学特征直接圈定石油储层和其它有意义的地质特征, 也便于记录横波和转换波, 利用多波综合研究岩性。资料处理相对于零偏 VSP 来说较为复杂, 对于解释主要波及反射点位置不好确定, 因为它随着接收点深度和旅行时间的变化在垂直和水平方向上都在改变, 速度剖面也在横向变化。

若是在单个的震源-检波器观测情况下, 其反射轨迹是随着界面深度增加, 反射点非线性地从井柱离开, 最后趋于震源和井之间的中心线上。当地层速度不同时, 射线在各个地层界面上发生折射。各反射点的连线随着地层加密也是一条光滑的曲线。当界面倾斜, 构造复杂时, 则反射点的分布更为复杂。

若是在多个震源、多个深度点观测时, 其地下的反射点轨迹是一簇曲线, 且相互之间有分布。随着界面深度增加, 中间地带的反射层空间采集变得越密, 反射点密度增加, 所以可极其精细地分辨地下某段的构造特征。

(3) 垂直地震剖面改进共深度点数据解释的基本原理

常规方法确定深度和标定层位剖面的反射特征要求使用叠加速度和声波测井曲线 (合成记录), 且测井曲线要有检查炮做旅行时校正。由于各种问题使得这项工作开展得特别困难, 而垂直地震剖面提供了另外一种行之有效的方法。VSP 将检查炮测量从初至旅行时的分析扩展到反射分析, 因为它在井中细小的深度间隔上 (每个波长至少测出 2 个点) 记录了完整的地震波形图。VSP 的特点是同时测量在深处传播过程中的上行地震波和下行地震波, 这些波场可被分离出来并用来加强一次反射。

了解 VSP 的基本原理可以使解释工作在鉴别共深度点数据的深度和反射特征方面更有把握, 其关键是 VSP 资料的处理工作。

VSP 数据采集的深度间隔为 50-100 英尺, 不至记录直达波, 还记录几秒长的完整记录, 这个深度间隔必须至少对所测量的最短波长采样两次, 其波长是测量所穿过的最低速度除以希望得到的最高频率。记录整个波场 (既包括上行波, 也包括下行波) 是 VSP 的基本性质, 借助于适当的处理, 就有可能把反射波从下行波中分离出来, 消除多次波, 加强一次反射。

VSP 处理与共深度点 (CDP) 处理相似。在开始阶段 (解编、用可控震源



时相关、编辑)之后,数据必须做波前几何扩散校正。此球面扩散校正由VSP速度分析确定,并包含一个直达波项和一个一次反射波项。VSP还必须滤波以分离上行波和下行波,时移到双程时间,反褶积以去掉多次波并使谱白化,最后叠加。

基本步骤是分离上行波和下行波,但要小心地保持原始数据并防止不需要的道间混波,很窄的 $f-k$ 滤波器可得到很好的结果。应该尽可能地避免使用窄通 $f-k$ 滤波器和加权道叠加,以保持相邻道(深度)的相位和振幅关系,这对后续的VSP处理(反褶积)和解释是相当重要的。

VSP处理的另一个基本步骤是反褶积,应该利用下行波场对上行波场反褶积。可由下行震源子波确定出每个深度的最佳算子。这个算子若与下行波褶积,则输出为宽带零相位子波;与同一深度的上行波褶积,就可得到检波器下方反射系数的宽带估计。

若VSP提取道,即沿着初至波后的一个狭长带相加得到的。这种性质的VSP道(VET)只包括一次反射波,并且在地震波长范围内是反射系数的最好估计。由VET道可鉴别合成记录上的假反射现象,即若VET上没有出现的反射层,而合成记录上出现了的就可解释为多次波。包含多次波和不包含多次波的VSP提取道VET可用来鉴别地面地震数据的反射,作为确定深度、地震反射特征和多次波存在的手段。

三. VSP资料处理的技术关键

垂直地震剖面法资料的计算机处理流程可分为四个部分:信号调整、频率和振幅的分析、速度滤波、反褶积等;处理方法在Ultra10 Sun工作站上实现。

(1) 信号调整

1) 叠加在每个测点记录的炮次,并进行带通滤波; 2) 用下行直达波的初至求取震源至给定深度上检波器的单程旅行时; 3) 对每个测点的记录进行归一化,使每道的下行波具有同样的能量。通过归一化可以补偿透射能量随着深度的衰减和由于仪器耦合作用的差别所造成的能量差异。4) 在给定的深度点上,由于球面发散作用,其能量也是随着时间增大而减小,所以需要进行真振幅恢复(TAR),并用一个时变增益函数以消除球面扩散引起的衰减。增益函数的形式如下:

$$G=[t/t_0]^{1+\beta},$$

式中 t_0 是记录道上初至的单程旅行时间, β 一般在0.25—0.5之间。该指数是根据速度与 t 的幂次成正比的假设而确定的,指数大时,增强续至波并突出深层反射。应当注意根据初至波和声波测井曲线资料能够精确确定适用于振幅恢复的增益函数。

(2) 速度滤波

使用最小二乘法速度滤波,把波场分离为下行波和上行波分量。该滤波



器的特点在于使用较强的随机采样间隔时,能有效地衰减下行波。在预期有倾斜反射界面时应该使用较小的记录道数。用最小二乘方法,使上行波和下行波的能量最小化;

这里给出可变采样速度滤波器设计思路:

每个深度测点上的信号都是下行波和上行波之和,即

$$S_k(t) = D_k(t) + U_k(t)$$

$$S_{k+1}(t) = D_k(t - \tau_{k+1}) + U_k(t + \tau_{k+1})$$

τ_k 已知,

求总和 $R(t)$ 的最小值 (t) (最小二乘方法)

$$R(t) = \sum_{k=1}^N [S_k(t) - D_k(t - \tau_k) - U_k(t + \tau_k)]^2, (k=1, N)$$

导出函数 $D(t)$ 和 $U(t)$

(3) 反褶积

用反褶积以衰减多次波和提高分辨率。但它的滤波器是根据下行直达波计算的,并用于下行波和上行反射波。通常分为两个步骤:首先是用预测反褶积压制短周期多次波,其次用整形反褶积以得到零相位信号。第一步用预测反褶积以消除多次波,其算子可根据下行波列的自相关函数逐个测点进行计算,然后将算子用于下行和上行波列。接着用波形反褶积使信号特征满足地震剖面的要求,并最终改善信噪比。最后在初至后的一个时窗内叠加所有的上行波,其所得的记录与合成地震记录很像,而实际上它是由真实的地震资料组成。其重要的参数是算子的计算时窗、算子长度和预测距离。算子长度等于时窗长度减去预测距离;预测距离位于自相关函数相交在第三个过零点处。通过比较预测反褶积前后的上行和下行波,可证明该方法的有效性。因为下行波必须有一个简单子波组成,容易看出它对下行多次波抑制的效果。第二步是进行子波整形。它将混合相位信号变换成对称的零相位信号,因此改善了总的分辨能力。最后的处理步骤是叠加上行波,并象合成地震记录一样将其结果在剖面上重复显示若干次,以便对比。

主要技术关键有:静校正,FX域最小平方分离波场,交互走廊切除法,克希霍夫法深度偏移法等。

① 静校正

求取全区各井静校正量,是为了与地面地震资料有较好的一致性,利用地面地震资料处理中所用的低降速带成果要对各井进行静校正量计算,否则两种剖面无法对比解释。

② FX域最小平方分离波场法

法国 CGG 公司的 VSP 资料处理解释软件 GEOVECTEURPLUS 7100 中 bhsepr



模块是进行波场分离的，其原理是利用 FX 域最小平方法进行波场分离，与传统的 中值滤波和 FK 波场分离方法比较，该模块具有波场分离完全，无波形畸变等优点。

③交互走廊切除法

为了保证与地面地震剖面吻合，先用低频的 VSP 叠加剖面与地面地震剖面镶嵌，再用高频的 VSP 叠加剖面与地面地震剖面镶嵌，并进行剖面效果分析。经过对上行波场反复对比研究和切除，直至得到最理想的镶嵌效果。

四. 处理流程和硬件配置

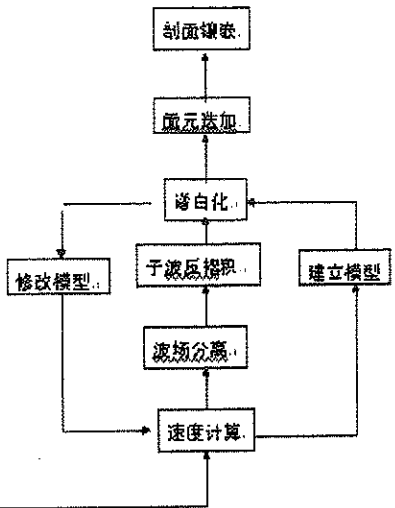
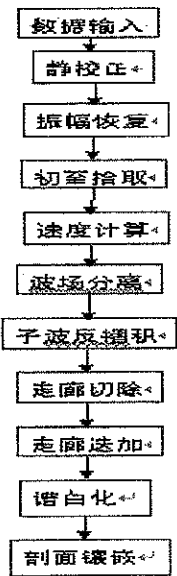
1. VSP 资料处理流程

常规的地震数据处理技术几乎都适应于垂直地震剖面的数据处理。典型的资料处理包括：解编、初步整理、分类、静校正、动校正、振幅均衡和调整、叠加、设计和应用于子波整形滤波器、多道速度滤波、作增益校正、上行波累积叠加（以便与地面地震资料很好连接）、合并上行波和下行波（通常上行波需要做振幅放大）、估算目的层传输函数、如果想用 VSP 产生目的层的波阻抗曲线，要求进行反滤波（即“道反演”）。

由于 VSP 资料采集分为零偏 VSP 地震资料采集和非零偏 VSP 地震资料采集，所以其资料处理也相应分为不同类型的处理。每组 VSP 资料都是特定的，因为激发和记录的条件逐井变化相当大。其通用的处理流程框图如下：

流程框图 1 零偏 VSP 地震资料处理流程

流程框图 2 非零偏 VSP 地震资料处理流程



2. 处理软件及硬件的配置

处理软件 GEOVECTEURPLUS 7100
SUN ULTRA SPARC O. S. SOLARIS 2.6



FORTRAN COMPILER: F77 VERSION 4.2

SUN ULTRA10 工作站

第四节 VSP 资料解释的基本原则和方法研究

计算机处理垂直地震剖面的输出最终结果: 旅行时、层速度、为反褶积准备的增强下行波、校正为双程旅行时的经过增强和反褶积的上行波、为和地面共深度点地震资料对比而从中抽出代表井眼附近一次反射波的数据道、传递函数、频谱分析和波阻抗测井曲线的估算等与岩石特征的联系比实际波形更容易。

声波测井曲线是测量紧靠井眼的岩石, 而 VSP 资料解释是测量地震波长量级的岩石。作为标定地震剖面上的反射波所对应的地质层位的手段, VSP 资料是最直接最准确的方法, 用 VSP 在地震旅行时间与地下的地质层位之间建立联系。

一. 利用 VSP 资料确定地质层位的前提条件

(1) 确认地层是否水平。如果不满足水平层状介质的条件, 井旁地震道的反射点位置与井下位置有偏离, 这时应使用偏移剖面。如果地震剖面在垂直于测线方向有明显倾角, 确定层位时就应使用三维偏移资料。

(2) 分析记录极性是否一致。对于原始记录来说, 地面地震的正常极性是初至波下跳, 而与此极性相同的 VSP 记录就该是初至波上跳。这是因为地面记录的初至波是从检波器下方到达检波器, 而 VSP 记录的初至波则是从检波器上方到达检波器。所以, 一方面要考虑极性和基准面是否一致, 另一方面要考虑二者频带范围是否一致。

二. 地质层位标定的基本原理

1. 直井 VSP 资料的层位标定的原理

垂直井有利于简单识别重要反射层的深度和单程旅行时间, 倾斜井有利于研究地下的水平偏移, 但倾斜井更难、资金更高, 因为一是震源和井中检波器的相对位置不可靠, 二是在记录资料过程中, 震源可能已经移动了几个不同的位置, 导致 VSP 成果中产生一次反射波的垂直深度、一次反射与多次反射之间的垂直时间关系值得怀疑。

在利用直井 VSP 资料进行层位标定时, 关键是利用桥式剖面把井下的深度值直接与地震剖面上的时间值一一对应起来, 建立起岩性与地震反射特征的关系。根据南阳、泌阳凹陷处理剖面的固定基准面(基准面为 100 米)对各 VSP 测井速度、时深关系曲线、地质分层数据都校正到统一的基准面上, 再进行层位标定及解释研究。

2. 斜井 VSP 资料的层位标定

①斜井空间标定的方法

该方法的基本原理是在斜井的井点轨迹上分别标定出目的层层位, 以确



定标志层和目的层与井旁地震道之间的关系。其技术关键是确定斜井轨迹的空间坐标 (x, y, h) ，并利用 VSP 资料信息求出时间 - 深度之间对应关系，找到目标点在地震数据体上的线号道号，以达到层位标定的目的。斜井中的 VSP 资料其映像更具有价值。斜井中记录 VSP 资料时，一般的做法是将震源布置在地面上，使它直接位于井中检波器的上方。每当检波器上移到新的位置时，地面震源也必须成水平方向移动至相应的新位置上（图 21），这样从 VSP 资料拾取的上行地震波场就是斜井轴线以下地下地质情况一次覆盖映像。

当波从震源传播到检波器上时，如果传播的路径近似于垂直方向就可以在在一定程度上简化 VSP 解释工作，若井孔垂直则地面上一般近偏移距激发都可满足这个条件。但若井孔是斜孔，为了满足这个条件就必须在整个记录过程中将震源点移动。在斜井观测中，引入一个称之为

“炮园”的概念，震源必须在这个炮园内激发，才能保持波的传播路径近似于一条垂线。“炮园”的直径不能超过测点深度的 2—3%，因此在钻井平台和炮点之间必须配备精确的导航设备。应该注意随着检波器由深到浅的移动提升，“炮园”也在

跟着移动，且其直径也在相应变小，“炮园”中心连线必须与钻孔在同一条直线上。对于高质量钻孔，其每个观测深度点对应的“炮园”中都可使用 X, Y 坐标表示出来，实际上相邻“炮园”之间存在着相当大的重叠。钻井轨迹是基于某一深度处的井斜角和方位角值，如果已知某一特定深度的井斜角和方位角，就可计算出测量点的位置，由于每个点相对于前一个点是固定的，利用“航迹推算法”可求出轨迹点的坐标。

设钻井轨迹的空间坐标为 (x, y, h) ，则轨迹的函数可表示为：

$$F=f(x, y, h) \quad (1)$$

对于每一个标志层或储（油）层在井轨迹上的斜深值，结合斜井在该点的井斜角，方位角等基础数据可求出坐标值（图 22 上）。设井点在地面的坐标为 (x_0, y_0, h_0) ，则可用下列递推方程求出任一目的层所在的空间坐标 (x_i, y_i, h_i) 。

$$x_i = x_0 + l_i \sin \alpha_i \cos \beta_i \dots \quad (2)$$

$$y_i = y_0 + l_i \sin \alpha_i \sin \beta_i \dots \quad (3)$$

$$h_i = h_0 + l_i \cos \alpha_i \dots \quad (4)$$

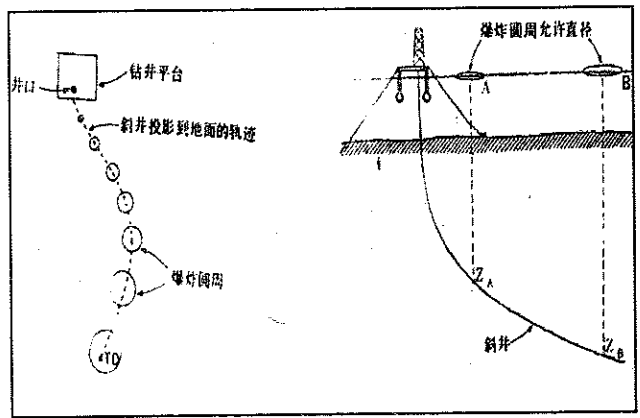


图 21 斜井 VSP 野外采集炮检布设示意图



$$x_i = x_{i-1} + l_i \sin \alpha_i \cos \beta_i \dots \quad (5)$$

$$y_i = y_{i-1} + l_i \sin \alpha_i \sin \beta_i \dots \quad (6)$$

$$h_i = h_0 + \sum_{j=1}^i l_j \cos \alpha_j \dots \quad (7)$$

式中 l_j 为相邻两拐点间的井段长度, α_i 为第 i 个点的井斜角, β_i 为第 i 个点的方位角。

由(2)-(7)式可求出目的层的空间坐标(图22下), 由 x_i 、 y_i 找到对应的线号道号。由 VSP 速度将 h_i 转换为对应的时间值 T_i , 即可在相应的剖面上标定出目的层所对应的位置。此时再用斜井的非零偏 VSP 资料沿着井轨迹进行对比标定。

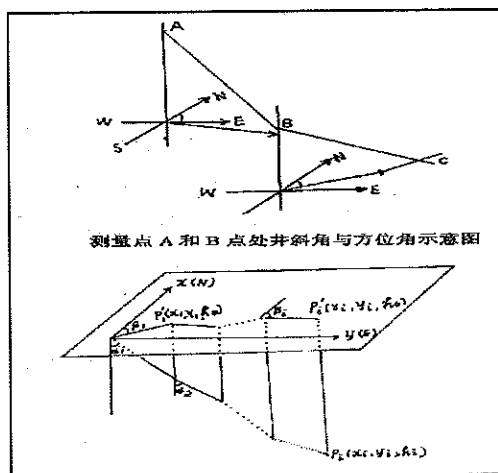


图 22 斜井轨迹及与方位角关系图示

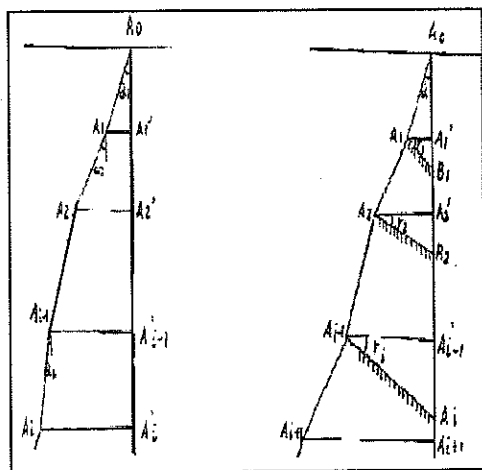


图 23 井斜校正及岩层倾角校正示意图

② 虚拟井的层位标定技术

之所以称为虚拟井的层位标定技术, 是因为它不是沿着井轨迹进行标定, 而是以井口为起点, 沿直井进行层位标定。

该技术的应用首先假设在一定范围内同一地层岩性相同。因为速度是岩性与深度的函数, 在不考虑深度影响时, 同一地层内因岩性相同则速度相同, 这可保证同一地层内, 不同的位置具有相同的反射特征。其后对地质分层进行井斜校正和深度校正后就可沿虚拟直井进行层位标定。

首先要进行井斜校正, 井斜校正就是把斜井校正到铅直方向上(图23左):

$$h_i = l_i \cos \alpha_i \dots \dots \dots (8)$$

l_i —斜井的第 i 段长度, α_i —第 i 个拐点的井斜角, h_i —斜井在铅直方向上投影深度。

其次要进行深度校正。深度校正也称地层倾角校正, 就是把斜井轨迹上



的地质分层沿地层方向归位校正到铅直方向(图 23 右),且令 $v_i(\alpha_i) = v_i'(\alpha_i)$, 即

$$\Delta h_1 = A_1' B_1 = l_1 \sin \alpha_1 \operatorname{tg} \gamma_1 \dots \dots \dots (9)$$

$$\Delta h_2 = A_2' B_2 = (l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin \alpha_2) \operatorname{tg} \gamma_2 \dots \dots \dots (10)$$

.....

则
$$\Delta h_n = \left(\sum_{i=1}^n l_i \sin \alpha_i \right) \operatorname{tg} \gamma_n \dots \dots \dots (11)$$

式中 γ_n -- 第 n 层的地层倾角。

则斜井校正到垂向的井深为:

$$H = h_n + \Delta h_n = \sum_{i=1}^n l_i \cos \alpha_i + \left(\sum_{i=1}^n l_i \sin \alpha_i \right) \operatorname{tg} \gamma_n \dots \dots \dots (12)$$

式中 l_i 为相邻两拐点间的井段长度, α_i 为第 i 个点的井斜角, β_i 为第 i 个点的方位角。

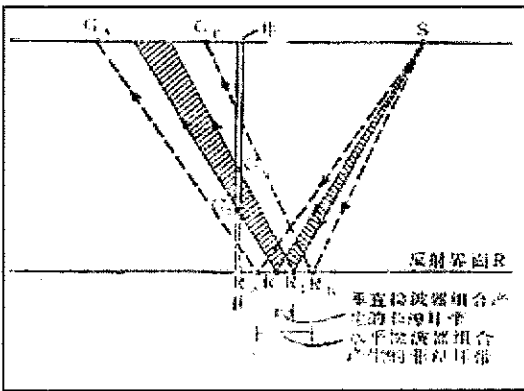
三. VSP 剖面改善资料横向和纵向分辨率的理论研究

1. VSP 剖面记录几何形状对水平分辨率的影响分析

只要记录和处理得当的 VSP 剖面, 其资料就能观察并眼周围地质情况, 且比地面地震资料精度更高, 这是因为 VSP 震源 - 检波器记录的几何形状所产生的第一个菲涅尔带比地面地震资料时采用的震源 - 检波器形状产生的要小。

由地表地震资料所能解决的地下异常体的最小横向尺度定义为一个菲涅尔带。VSP 资料提供的横向分辨力比地表地震资料更为精确, 就因为它的菲涅尔带小于地表地震的菲涅尔带。

之所以 VSP 剖面的地下分辨率更好, 就是因为接近于研究的对象时观测得更细。如果研究对象是并眼附近深部地质构造, 则观测用的检波器就必须沿着并眼移动检波器, 使它尽可能地接近研究的对象。从技术方面分析: 水平地震剖面法所用的震源 - 检波器几何形状的路径与垂直地震剖面法中的路径相比较, 就可说明 VSP 资料的水平分辨率更高。在图 24 中, 如果水平记录路径的长度 $SR_A G_A$ 和 $SR_B G_B$ 之差为 λ



径的长度 $SR_A G_A$ 和 $SR_B G_B$ 之差为 λ (λ 为地震主波长), 根据定义, 反射界面上的距离 $R_A R_B$ 就是 $G_A S G_B$ 获得的地面地震记录的第一个菲涅尔带的半径。如果要在与 $SR_A G_A$ 和 $SR_B G_B$ 路径的常规地震记录上分辨出地质特征, 则这个界面上的地质特征的水平距离必须大于

图 24 地面地震与垂直剖面地震横向分辨率对比



R_1R_2 。可是当检波器组合的排列由水平方向变为垂直方向时，两种连续路径 SR_1G_1 和 SR_2G_2 (两者的长度之差 $\lambda/2$)，在用垂直检波器组合记录时，其互靠近的程度，总比水平检波器组合记录的相应路径 (SR_1G_A 和 SR_2G_B) 要小得多。这样距离 R_1R_2 就是地面检波器组合变为垂直方向组合的第一个菲涅尔带半径。因为 R_1R_2 比 R_1R_B 小，即是说用垂直检波器组合的记录反射就可提高地下水平分辨率。因此要是把检波器组合放到井下深处，使之尽量靠近要取得的映象的地质条件，更可以大大提高分辨率。

2. 利用 VSP 资料改进垂直分辨率的分析

VSP 资料除提高地下地质层位的水平分辨率外，VSP 资料的下行波场还可用于计算数学算子，来改进 VSP 资料和地面地震资料的垂直分辨率。地面地震资料难于解释的一个原因是

每一个反射界面都要多次成像。目前用来减少地面地震资料多次波的映像的一种成功方法是根据一次反射波与多次反射波的叠加速度的差别来区别一次反射波和多次反射波，而反褶积算子的发展可能成为更加有效的方法，它主要是滤掉地面记录的地震响应，保留一次反射波，而衰减多次波反射。而反褶积算子可从布置在地面的检波器记录的上行地震波场

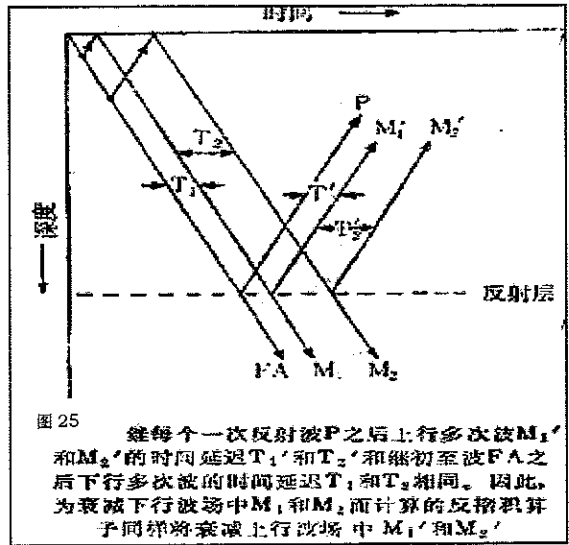


图 25

在每个一次反射波 P 之后上行多次波 M_1' 和 M_2' 的时间延迟 T_1' 和 T_2' 和继初至波 FA 之后下行多次波的时间延迟 T_1 和 T_2 相同。因此，为衰减下行波场中 M_1 和 M_2 而计算的反褶积算子同样将衰减上行波场中 M_1' 和 M_2' 。

但从 VSP 资料的下面两个特点可知 VSP 资料能为计算反褶积的算子提供的方法更为有效和实用：

首先它的上行一次反射波及与之相关上行多次反射波之间的时间延迟和相对振幅差与下行初至波及与之相关的下行多次波之间存在的时间延迟和相对振幅差一样 (图 25)。图中各下行多次波之间的时间延迟 T_1 和 T_2 与各上行多次波之间的时间延迟相同。同样地，振幅比 M_1-FA 及 M_2-FA 与振幅 $M_1'-P$ 及 $M_2'-P$ 也相同。因为反褶积的算子的数学性质决定于上述时间延迟和振幅比，因此若有 VSP 资料可用，则无论根据下行地震波场或上行地震波场，都可计算出反褶积算子。

其次，因为地面地震的检波器记录不到下行波场，且上行波场的反射系数比下行波场的反射系数要弱 10-100 倍。所以较强的下行波场的信噪比性质要比上行波场的信噪比性质好。这正是要利用 VSP 资料的下行地震波场确定反褶积算子更为可靠的重要性。

四. 计算地震子波反射系数



反射系数是地震波在地层中产生反射规律的重要参数。当地震波从具有不同声阻抗岩层界面上反射时，其反射子波的极性、振幅和相位特性均由该界面上的反射系数来决定。波阻抗界面上反射子波的极性取决于入射波的方向，最重要的是了解质点速度波场的反射波和压力波场的反射波之间在反射系数上的差别。

野外记录地震数据时，一般用以下三种检波器：测量质点速度的地震检波器、测量质点加速度的加速度检波器和测量压力的水下检波器或水听器。所以对于法线入射的平面地震波，可用三个常用的速度波参数来定义其反射系数：

对于下行质点速度波/下行质点加速度波/上行反射波其反射系数为：

$$R = \frac{\rho_{n-1} * v_{n-1} - \rho_n * v_n}{\rho_{n-1} * v_{n-1} + \rho_n * v_n}$$

对于上行质点速度波/上行质点加速度波/下行纵波其反射系数为：

$$R = \frac{\rho_n * v_n - \rho_{n-1} * v_{n-1}}{\rho_n * v_n + \rho_{n-1} * v_{n-1}}$$

若 R_v 和 T_v 代表入射质点速度场在波阻抗界面上的反射系数和透射系数， R_p 和 T_p 代表阻抗界面上下行入射纵波波场的反射系数和透射系数。任意波阻抗界面上有： $R_p = -R_v$ 。而反射和透射之间的函数关系与压力和质点速度的特征无关，即：

$$T_v = 1 + R_v, \text{ 并且 } T_p = 1 + R_p$$

上式为透射系数 T 的数学公式，该方程也可用三个常用的动力学变量同沿法线方向入射在界面上时的平面地震波联系起来，即

对于下行质点速度波/下行质点加速度波/上行纵波其反射系数为：

$$R = \frac{2\rho_{n-1} * v_{n-1}}{\rho_{n-1} * v_{n-1} + \rho_n * v_n}$$

对于上行质点速度波/上行质点加速度波/下行纵波反射系数为：

$$R = \frac{2\rho_n * v_n}{\rho_n * v_n + \rho_{n-1} * v_{n-1}}$$

公式中 n 层位于 $n-1$ 层的下面。

第五章 VSP 一体化技术研究

第一节 VSP 采集·处理·解释一体化的发展趋势

VSP 是一种井中测量技术，采集时地震检波器和地震震源都必须沿着垂直方向布设，它可测量井眼附近地层剖面中传播的下行波场和上行波场的性



质,故能够以某些独特而很有价值的方式来利用垂直地震剖面资料。

垂直地震剖面可作为一种高分辨率地震技术,可对井眼附近作详细研究,并能精确连结地面地震记录和测井曲线。垂直地震剖面提供了井眼附近的精确的地震记录:其横向研究宽度介于地面地震和测井二者之间,若考虑该信息是由反射层的半个菲涅尔带所提供的,那么一个平均 VSP 剖面的研究半径为 40m。

VSP 的野外工作方法是影响 VSP 质量的重要因素之一。有的方法可压制噪声,但同时又会产生其它副作用。野外方法选择不当,即使采用了先进的数字技术和一流的仪器设备,其测试结果仍然有较强的噪声或子波干扰。野外工作方法与效率相关,同一个方法在一个地区适应,但在另一个地区就可能不适用。

为使 VSP 垂直地震剖面经济有效要求垂直地震剖面采集方法最佳化;处理资料时应该尽可能从垂直地震剖面中获得更多的信息,以使测量成本合理;

由于 VSP 资料成果解释是用以地质层位的标定、层速度计算、地质构造分析和储藏预测,但需结合常规地震勘探资料的采集因素、处理方法,它要求 VSP 的野外生产参数的确定和资料处理的精度,具体地包括对信噪比和分辨率等方面的要求都必须与地面地震勘探的采集、处理、解释保持同样的量值或相近的参数。以逐步实现 VSP 资料采集·处理·解释一体化,这既是能源勘探开发地质任务的要求,也是 VSP 技术发展的必然趋势。

第二节 VSP 采集·处理·解释的一体化技术的思想

一. 资料采集是 VSP 处理、解释的基础和质量成败的关键

VSP 的野外采集工作不仅是资料处理和解释的基础,而且是涉及资料质量的关键阶段。VSP 采集所带来的困难是由于使用单个检波器,既不能记录耦合有关增益,又不能象地面地震用几千个检波器以均化耦合条件,记录 VSP 的时间常常又受多种因素的限制。

为避免假频,在数据采集时必须仔细选择深度采样间隔,在最短波长范围内,至少有两个以上的采样点。在 VSP 测量中不仅要使时间采样覆盖所有的频率,而且在空间采样间隔上要覆盖空间波长。因为 VSP 资料记录上的某些特性必须经过二维滤波和速度滤波才能得出,所以深度采样显得尤为重要,特别是分离上行波和下行波时,必需作速度滤波,如果时间和深度采样间隔过大,就会存在假频,这样得不到最好的分辨率。总之采集中使用有限的离散采样和低采样率限制了旅行时的分辨率。

采集过程中,设置近源场(井口)检波器来获得近源场子波记录,其主要目的在于监测 VSP 震源子波的一致性。一般井下检波器记录既携带着测点附近地层或流体的信息,又携带着勘探区内的地层和构造信息。可用近源场



子波记录并与井下实测记录的对比来提取有用的地质资料,同时也可监视井下检波器记录质量。

波散介质使传播波形的相位发生畸变,由于衰减使波形在剖面内的传播过程中变弱,最后层间多次波可能会使最大能量团的到达时间有一定延迟,这些原因造成旅行时的细小误差,能够引起速度的巨大变化,这些都会给资料处理提出较高的要求。

资料采集经常可获得相邻测点仅相距 3-7ms 的记录,所以能够得到高分辨率时深曲线,这样可做出精确的速度分析。同时对下行波列的分析可提供地震波的大地滤波作用与深度关系的资料,能量衰减和相位都可计算出来以便于资料的解释。采集对震源的要求是重复性好,能量强,激发的子波波形一致性好,且频带宽。

二. VSP 的资料处理是采集和解释的媒介,也是 VSP 资料发挥重要作用的主要手段

固定在井壁上的检波器可接收两个相反方向的信息:下行波和上行波(反射波)。通过处理会分离出这两种波列,因而可从两个波列中提取详细的信息。准确了解所有深度上的下行波列可计算出用于褶积上行波的反褶积算子,这样可处理出高分辨率的 VSP 资料,并对地层响应的假设程度可减至最小。

实际试验和生产中野外原始资料存在的问题要要必需的处理手段来弥补和补充。例如反射能量很弱,以致被下行波列、随机干扰和相干噪声弄得模糊不清,必须对震源波形上行波的变化、震源位置、交混回响、多次波及其它变量进行校正。

在 VSP 资料的处理中,针对野外采集的资料进行一系列相关而有目标的处理,常常通过叠加和带通滤波改进信噪比;用速度滤波方法分离上行和下行波列;用反褶积消除多次波,并调整期望输出的波长,以使 VSP 记录与地震剖面相匹配。最佳的资料处理称之为“解释处理”,它是边处理边解释,再处理再解释,直到获得理想的解释结果为止。

根据处理 VSP 资料的关键步骤可知处理与采集和解释是密切相关的,且可完全体现处理是重要的媒介作用。处理中的子波整形主要是用监视记录详细研究波场的动力学和运动学特性;为了了解 VSP 资料并利用资料,从记录的全波场中分离上行波和下行波;在频率域内利用每个记录深度上的输入和输出来计算传递函数,以便进行较好地估算岩性的声学特性;由地层深处的反射波列的记录计算声阻抗曲线;可从下行波研究多次波,通过对其图形与深度的关系,可求出多次波的来源。

垂直地震剖面最为显著的特点是垂直的,即正常时差效应最小,极大简化了大倾角反射层的分析以及断层地区记录资料的解释。

了解垂直地震剖面反褶积的性质对增强解释员的信心是很有必要的。垂



直地震剖面经过反褶积后,其极性调整为波谷相当于正反射系数,相位校正为零相位子波,并展平频谱以改善分辨率。主要的多次波被衰减,长的下行震源波形被压缩,这些垂直地震剖面测量结果提供了井眼附近的一次反射波资料。

由于处理结果可靠,垂直地震剖面可用来鉴别地面共深度点资料处理的不足,如多次波和相位问题。垂直地震剖面提供的高分辨率也改善了地震资料的解释。

三. VSP 资料解释是面向对象的最终用户,也是对采集和处理进行质量监督检查的环节

将记录的波场分离为上行和下行分量,同时通过衰减多次波和整形来提高分辨率。解释中感兴趣的主要是上行波场,因为它包含有井底以上和井底以下的反射界面的资料。下行波场也一样重要,因为可用它来计算用于衰减多次波和波形整形的反褶积算子。

这些结果依赖于信噪比,最重要的采集参数是井下测点间隔和频带宽度,因为它控制着数据处理阶段使用频率-波数滤波器的假频现象。如果要研究振幅和检查每一道的时间原点,则记录近场源子波有头等重要的意义。如果希望所有道的上行波有良好的清晰度,就必须在记录时强烈地衰减井筒波。对记录 S 波 VSP 资料而言,检查井内泥浆液面和震源位置以减小井筒波的振幅是一件有意义但必须要求做的事情。

垂直地震剖面中记录的测点数是由该区和该井的地质和地球物理任务所决定,与浅层反射的地震特征对比,对分析深层资料常常是必要的。它在识别多次波、评价地面地震共深度点资料及改进模拟模型时尤为重要。测量的长度也会影响通过空间滤波分离上行波和下行波的能力,通常记录的测量点数越多,垂直地震剖面处理后的横向分辨率越好,而且斜井中测量的范围可确定反射的井下横向覆盖次数。

第三节 实现 VSP 一体化技术必须考虑的因素

一. VSP 一体化技术对 VSP 资料采集的要求

采集中影响 VSP 资料质量的因素:

- (1) 使用的震源不当,信号强度低,重复性差,限制了地震记录的带宽;
- (2) 记录仪器的动态范围小,可能使波的振幅和相位发生畸变;
- (3) 试验点地震噪声污染严重;
- (4) 不佳的野外观测系统和生产方法;

改进采集质量的主要方法是井下检波器设计及记录和质量控制设备的改进,特别是三分量检波器的耦合。VSP 与地面地震资料剖面相关不好时,分析可能的原因是在地面地震数据处理上没有补偿仪器延迟;相位重复较差;可能存在多次波;经验证明 VSP 资料可使地面数据资料处理得更好,速



度分析结果可解释得更加准确，反褶积效果可能更加有改进。

若仔细研究一下给定的上行波的水平变化特征就可以指示多次波的存在，所以在任何上行波上有恒定信噪比是很有必要的，这也是在记录 VSP 资料就必须减少井筒波的另一个原因。

VSP 数据采集类似于加密的检查炮测量，深度间隔为 50-100 英尺，不仅记录直达波，还记录几秒长的完整记录。这个深度间隔必须至少对所测量的最短波长采样两次，其波长是测量所穿过的最低速度除以希望得到的最高频率。

二. VSP 一体化技术对 VSP 资料处理和解释的要求

要求对 VSP 资料的处理和解释要建立在等时增量的 VSP (CTVSP) 数据之上，其优点是对采样足够的的数据，二维数据滤波更加有效。特别是易将上行波和下行波分开，把数据从最浅检波器延伸至地面，将显示出一次波和与之相关的地面多次波的交点，这个交点可做为质量控制，用来证明时间关系是否准确。由于 VSP 数据外推到地面后相当于地面地震数据，所以在对比研究地面地震和 VSP 数据中很有作用。

处理流程中要求计算和利用 VSP 的提取道，因为它是沿着初至波后的一个狭长带相加得到的，这种性质的 VSP 道 (VET) 只包括一次反射波，并且在地震波长范围内是反射系数的最好估计。由 VET 道可鉴别合成记录上的假反射现象，即若 VET 上没有出现的反射层，而合成记录上出现了的就可解释为多次波。包含多次波和不包含多次波的 VSP 的提取道 VET 可用来鉴别地面地震数据的反射，作为确定深度、地震反射特征和多次波存在的手段。通过旅行时和波形的差别可以诊断采集中的问题，并在处理中予以校正。

从 VSP 中提取的反褶积算子既满意地消除了直达波之后的下行多次波，又可使 VSP 直达波变成了更好的波形。简单却又很重要的 VSP 理论可借助于射线追踪模拟来论证，射线追踪是为了研究地震波的反射和透射而建立的一种处理过程，适用于与地下构造和地层密切相关的地表反射数据的特征，提供了 VSP 资料解释的八项基本规则，它可提供计算合成垂直地震剖面的能力。它可解决模拟的 VSP 问题有从 VSP 数据中测定反射地层的倾角；对于给定的震源-反射层-测井观测系统中 VSP 覆盖范围；在 VSP 数据中识别角度不整合；用 VSP 资料判断断层；多大的断距可在 VSP 资料中识别出来；在 VSP 数据中需用多大的频带和时间精度，才能探测靠近钻井特殊地层异常。

射线追踪模拟除了能提供 VSP 数据中的构造和地震地层学信息外，还可以研究 VSP 最佳野外观测系统。通过上述分析和讨论，可以建立如下 VSP 采集、处理和解释的关系图 (图 26)。

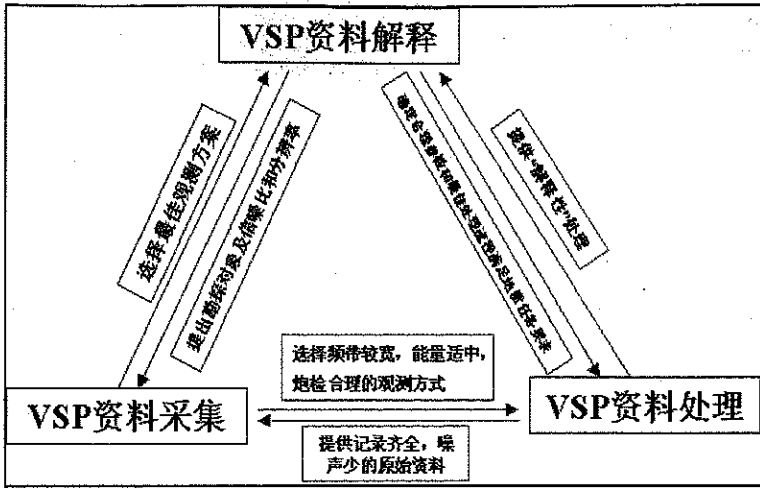


图 26 VSP 采集·处理·解释一体化关系图

第六章 VSP 一体化技术的应用

垂直地震剖面在地震勘探中的应用比较广泛, 首先由于 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。其次垂直地震剖面 (VSP) 可作为一种高分辨率地震勘探方法, 用来提高地下构造的横向和纵向分辨率。由于井下检波器和轻便的记录系统以及采集和处理技术的进步对井中地震波列的研究成为可能, 所以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。

针对南阳、泌阳凹陷的 VSP 资料, 一方面要求对原来采集 VSP 资料进行重新处理, 并对原有解释地质层位进行重新标定; 另一方面对要求新探井进行系统化、一体化的采集·处理·解释工作。这样既可以验证系统的先进性和科学性, 同时又可将新技术新成果推广应用到实际工作领域, 提高技术含量, 提高勘探开发的高效性和准确率, 进一步为增储上产做出新贡献。为此针对南阳和泌阳凹陷的 VSP 资料完成了如下的应用研究内容:

- (1) 求取速度资料 (包括平均速度和层速度、叠加速度)。
- (2) 确定地震反射层的地质层位, 识别多次波。
- (3) 为地面地震资料的处理和解释提供参数。
- (4) 做好新老资料的处理解释, 并进行剖面对比。
- (5) 通过对不同震源激发方式的研究, 确定选择一种激发子波稳定的震源。
- (6) 建立水平层状和倾斜地层模型, 进行射线追踪并合成正演剖面验证观测系统的适应性;



(7) 利用测井曲线合成垂直地震剖面与 vsp 剖面进行对比, 阐明 vsp 的优越性。

在处理过程中应用先进的法国 CGG 公司的 GEOVECTOR PLUS 7100 处理系统, 根据地震资料处理分析结果, 对 VSP 资料处理进行了统一的基准面校正, 所求取的速度、时深关系曲线以及地质分层数据都校正到统一的基准面上。

一. 识别地面地震剖面上的反射波

VSP 资料可用于逐级追踪地面观测到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。这涉及地震地质学的原理, 是地震地质解释的关键, 是实测地震数据实现最佳解释的基础。

如果已记录到研究井中地层产生的所有上行和下行波同相轴, 那么勘探人员就要着眼于上行波并回答有关上行波的问题: 上行波同相轴是一次反射波还是多次反射波? 在什么深度产生? 在什么时间到达地表? 用什么样的反射波形才能描述产生反射波同相轴地层的形态?

所有下行初至子波基本上是对称的, 这个零相位子波是由 P 波震源激发产生的, 在任意深度上初至波单程传播时由初至子波的第一个波各顶点的时间确定。每个点上的上行反射波同样也是对称子波, 它的旅行时由反射子波的中心相位顶点的时间确定。利用测定到达时的方法可确定对应的反射波同相轴。若反射波同相轴的中心相位是波峰, 但入射波的中心相位则是波谷。这种反向子波极性说明反射波一定是在下行速度脉冲具有负反射系数的地方产生。负反射系数界面的上行反射子波的质点速度矢量和入射质点速度矢量将会有 180 度的相移 (图 27)。

常规地面地震剖面横放在垂直地震剖面的上方, 找出对应的同相轴, 然后逐个测点向下追踪该波, 一直追踪到它的原点区, 可知其深度。同时可与录井岩性图对比, 以便判断其可靠性。还可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, 另外一种方法是桥式连接剖面来鉴定地层的反射层位, 综合垂直地震剖面的走廊叠加资料应该和通过 VSP 井的地面地震资料的对应。

二. 分析地面地震的勘探问题

1. VSP 剖面映象和地面地震剖面映象的对比

经过处理从垂直地震剖面资料提取的上行一次反射波, 在叠加以后可代表穿过地层的垂直切片 (由井眼开始扩展至震源所在的位置)。VSP 资料的成像的水平距离可以随着震源远离井眼而增大。

图 28 为泌 206 井的零偏 VSP 资料, H_2 底界面深度为 728m, 单程时间为 299.4ms, 双程时间为 598.8ms, VSP 迭加剖面上为负、正相位的平衡点, 地面地震剖面上为正负相位的平衡点, 二者对应较好; H_3^1 底界面深度 852m, 单程时间为 341ms, 双程时间为 682ms, VSP 迭加剖面上为一负相位, 地面地震剖面上亦为一负相位, 二者吻合较好; H_3^2 底界面深度 1053m, 单程时间为

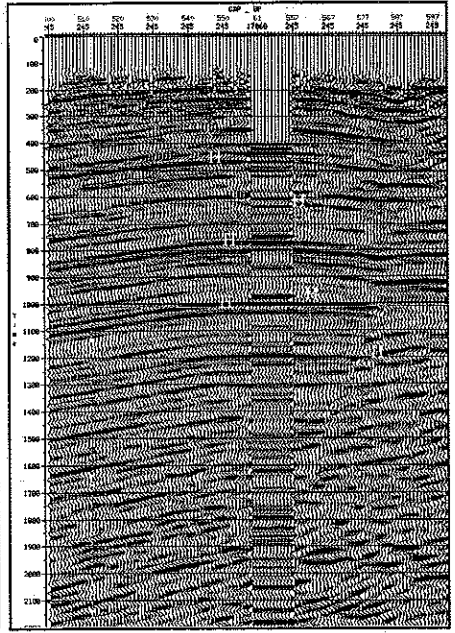
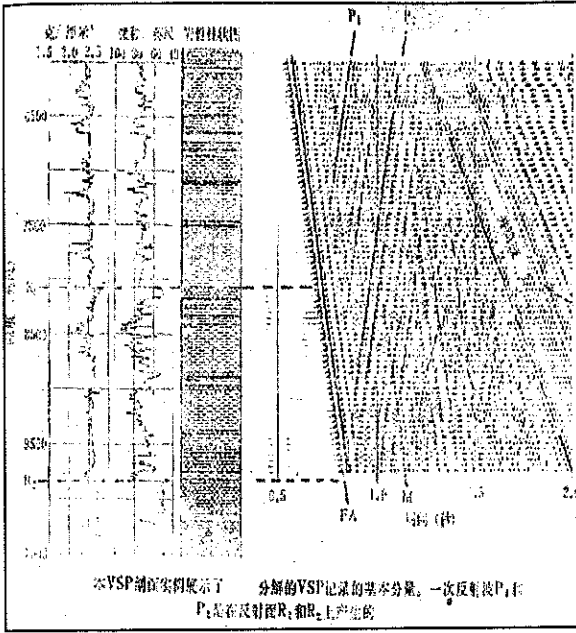


图 27 引用 Hardage (1983) 图说明一次反射波的识别 图 28 B206 井 VSP 镶嵌剖面对比

408.7ms, 双程时间为 817.4ms, VSP 迭加剖面上为一弱相位, 地面地震剖面上为一负相位; H_3^3 底界面深度 1261m, 单程时间为 478.5ms, 双程时间为 957ms, VSP 迭加剖面上为一正相位前的负相位, 地面地震剖面上为一负相位, 二者吻合较好; H_3^4 底界面深度 1424m, 单程时间为 526ms, 双程时间为 1052ms, VSP 迭加剖面上为一弱的相位, 地面地震剖面上为强的负相位, 该组波对应吻合较好; H_3^5 底界面深度 1561m, 单程时间为 562.5ms, 双程时间为 1125ms, VSP 迭加剖面上为一负相位, 地面地震剖面上亦为一负相位, 二者吻合较好; 该井 VSP 迭加剖面与地面地震剖面吻合较好, 地质层位对应良好。

2. 识别地面记录资料中的多次波

原始 VSP 记录上多次波的特征主要表现为 ① 多次波同相轴与相应的一次波同相轴大致平行, 但多次波的旅行时大于相应的一次波的旅行时 (这里的多次波与一次波是指由同一界面产生的反射); ② 上行一次反射波与下行直达波同相轴相交, 其终止点在直达波上, 但层间多次波的同相轴与下行直达波不能相交, 这是识别多次波的主要标志; ③ 多次波同相轴终止的深度位置指

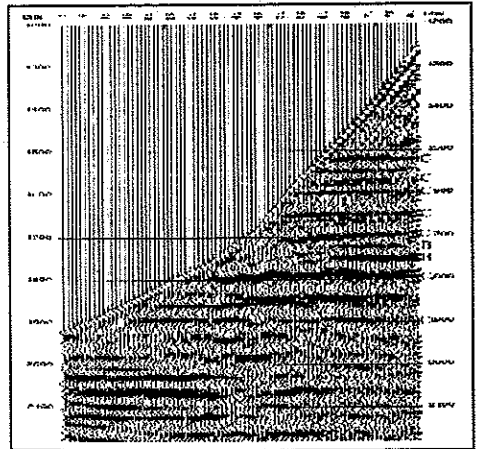


图 29A 已排齐的宝-201 井的上行波



示形成多次波的最深一次反射的反射界面，由此可以判断多次波的来源；④追踪多次波同相轴的整个形态及其与其它同相轴的连结关系，可以判明多次波在各个界面上来回反射的传播过程。

图 29A 是从宝 201 井中实际观测的且已经过上、下行波场分离和排齐的上行波场的 VSP 资料，从图中可以识别出一次反射和多次反射，以及与多次反射相应的最深一次反射的反射界面：在图中 1.72—1.75s 处的一组多次反射同相轴，可以解释为由浅部 1.52s 处的反射界面形成的层间多次波。图 29B 是宝 201 井的资料经滤波后，上行波和下行波重新复合在一起按单程时间显示的 VSP 记录，从图中可以清楚地看出层间多次波 B 及其在该层顶底面之间上下来回反射的过程。根据 VSP 多次波同相轴与下行直达波不能相交（多次波同相轴较短）这一特点，在用 VSP 资料作合成记录（做走廊叠加）前，先做走廊切除，如图 29C 所示，可以有效地消除掉多次反射波的同相轴（因为多次波同相轴基本都在切除掉部分）。图 29D 为用宝 201 井的 VSP 资料提取的经时移排齐的上行波记录（左图）、上行波走廊叠加道（合成记录）（中图）和过井地面地震记录 298 线剖面（右图）的对比图。通过三幅图的对比可以看出，在 298 线过宝 201 井位置，剖面中 1.75s 处的弱同相轴是来自 1.52s 处强同相轴产生的层间多次反

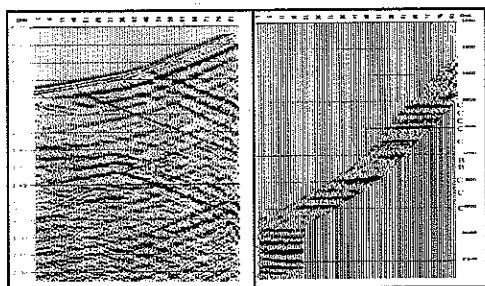


图 29B 上下行波重新复合显示图 图 29C 由图 25 作切除后走廊剖面

C-标记一次反射波，B-标记多次反射波

3. 斜井中的垂直地震剖面映像

斜井中的 VSP 映像通过三维勘探网的部分垂直切片与斜井 VSP 资料剖面对比：水平分辨率、垂直分辨率、断层、角度不整合、地层倾角、不整合面之下的储积层。高分辨率地震资料在油田开发中的一个重要应用是帮助从井眼横向外推井的资料（图 30）。从图中可以知道，通过 B EW17 井的斜井观测的 VSP 剖面，除了浅、中、深三个不

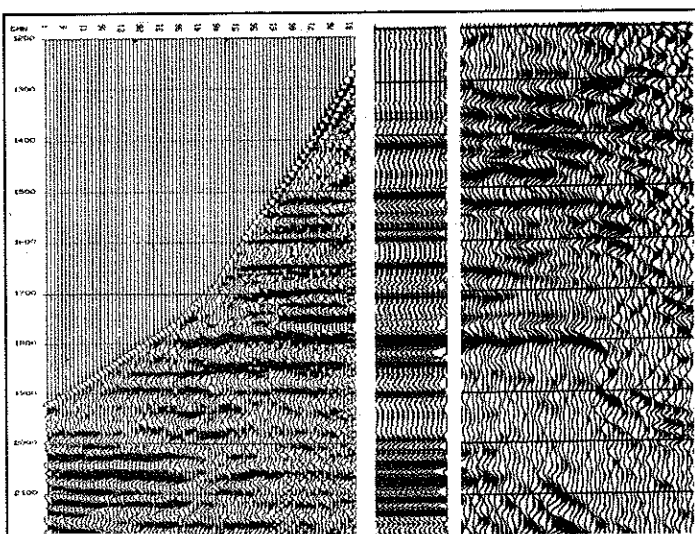


图 29D 宝 201 井排齐上行波记录、走廊叠加和地震剖面对比



同深度的地质层位对应较好外，不仅在横向上拓宽和外推了 VSP 剖面资料，而且在电测井深度以下的地段，同样有深部地质地层清晰的映像。它比常规速度测量有如下的改进：

- (1) 垂直地震剖面为构造和地层信息提供了范围广泛的横向反射覆盖。
- (2) 如果没有测井资料进行合成地震记录的垂直深度校正，垂直地震剖面也可把反射层与观测深度和测井的资料直接连接起来。
- (3) 垂直地震剖面可以提供远离井眼延伸的横向分辨率反射资料，其费用仅略超过常规速度测量。

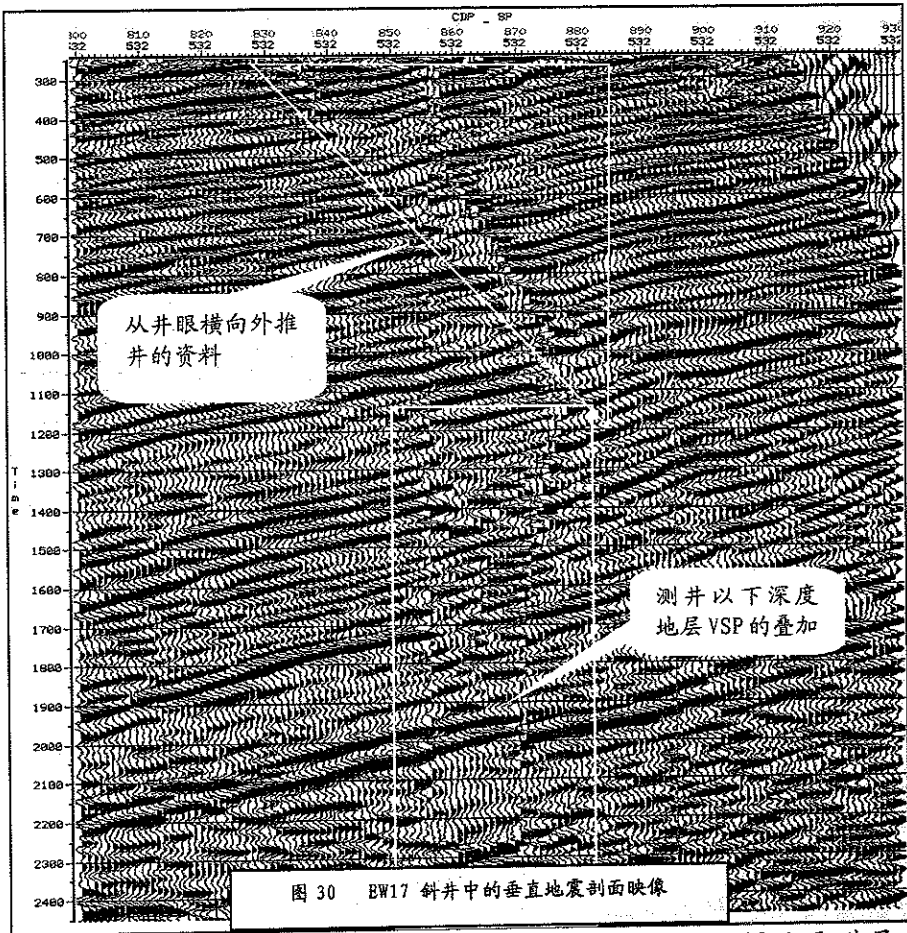


图 30 BW17 斜井中的垂直地震剖面映像

斜井垂直地震剖面使地震资料用于储集层边界圈定取得重要进展。将继续努力从 VSP 资料获得井以外更多的资料，并改善地面地震资料和测井资料的利用。它以优越的分辨率为证实断层和反射层的横向连续性提供了一种经济有效的手段。

三. VSP 记录与合成地震记录的比较

合成垂直地震剖面是用井中的声波测井和密度测井资料计算出声波阻抗，并由此计算出反射系数，推导出一个合成垂直地震剖面，它包括井中产

生的所有一次波和多次波的资料。合成垂直剖面是以脉冲响应的形式计算的，然后将其与用户的子波反褶积，它们有助于解释垂直地震剖面。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垂直地震资料、测井资料精确的连结起来，起着桥梁作用。解释合成地震记录、实际 VSP 记录和合成的 VSP 记录可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接起来。

合成垂直地震记录应当是且今后仍将是地震解释的基础，因为它在地质与地震响应的对比中发挥很大作用。但是声波测井资料和密度测井资料不能精确测量地震波前传播时遇到的声波阻抗序列。原因是井下测井仪所研究的地层范围要比地震波场所能达到的范围小得多。在有些地层剖面中，井眼周围的岩石性质，即使能为测井仪器精确测定，也不会从井眼向外横向延伸得太远。

通常建立在地表地震资料与地下地层学一致基础上的传统工具是合成地震记录。但在地震地质解释中 VSP 记录将是更准确、更直观、更有效的工具，因为它是真实地震测量。它能反映出地下第一个菲涅尔半径带范围内横向阻抗的变化，而合成地震记录却不行。合成地震记录可以表示一种反射，尽管测井数据也是正确的，合成地震记录也是精确的，但测井数据仅反映了那些非常靠近钻孔的岩石性质。

VSP 资料的另外一个特点是 VSP 资料总体提供的井眼附近的地质信息要比合成地震记录所能提供的地质信息要多得多。如果 VSP 记录对距离井眼一定水平距离的地下地质体成像，则在成像区范围内发生的断层反射，往往可从 VSP 记录的同相轴的中断或突然改变特征得知（当从原点向上追踪时）。而这种解释又是合成地震记录所不具备的洞察力，同时，若当这些断层信息来自发生在井底以下的记录时间时，合成地震记录也是无法发现的，因为它只用了测井资料来制作合成地震记录。根据测井曲线对泌 261 井进行垂直地震剖面的合成(图 31)，通过分析发现垂直合成剖面与地面地震剖面的吻合情

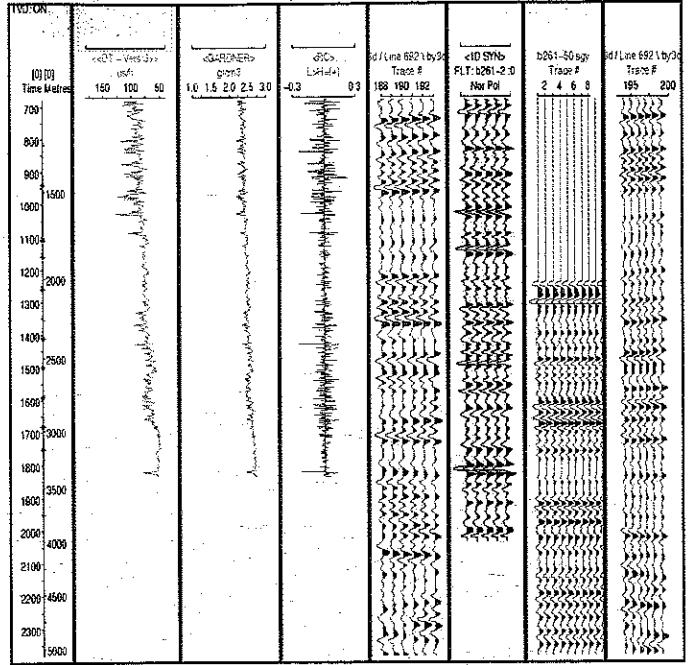


图 31 B261 井垂直地震剖面合成记录与 vsp 资料对比

况良好，与 VSP 垂直地震剖面对比效果也好，只是对应层位的能量强弱存在差别，但测井曲线以下深度，垂直合成剖面向下的中断处，却依然能发现垂直剖面上有清楚的层位出现，且能够与地面地震剖面进行对比，吻合情况基本良好，所以观察井底以下地层的情况的能力又是 VSP 资料优越于测井资料的又一长处。

四. VSP 资料的水平分辨率和垂直分辨率

若地下一个砂岩体是侧向延伸有限且小于地面地震资料的第一个菲涅尔半径带，它是一个绕射体，确实不是一个反射层（图 32），因此在地面地震资料中砂岩体未能成像呈现为反射同相轴。然而声波测井和密度测井资料却都很精确，制作的合成地震记录将表明相邻界面上各有地震反射。现假设地面地震资料和测井资料都能精确测定所研究的那部分地层的声波阻抗，但已成像的地质情况究竟属于哪个类型？合成地震记录与地面地震记录的反射资料在这一点上是不一致的。所以对任意一口井的研究工作中，特别是对于合成地震记录与地面地震记录资料不一致时，垂直地震剖面是可以用来有把握地确定上行一次波反射同相轴的后备方法。

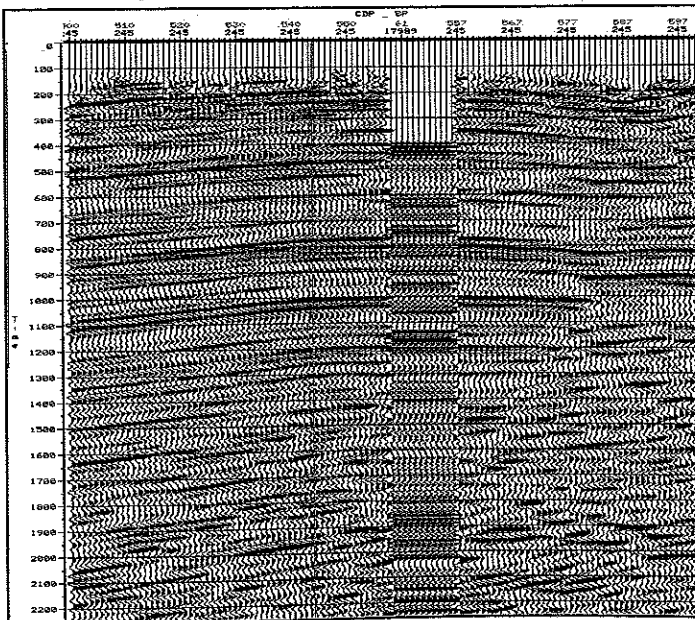
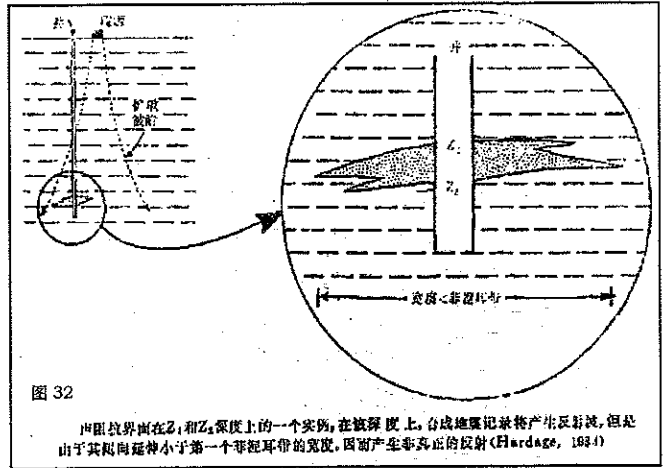


图 33 B206 井高频处理显示 VSP 垂向分辨率的优势

来尽可能地满足 VSP 剖面与地面地震剖面的频率一致。这里选择 B206 井进

垂直地震剖面技术是一种很有潜力的高分辨率技术，由于地震波只穿越浅层（低速层）一次，所以比地面地震资料的常规地震的分辨率高得多。在资料处理过程中，通常采用交互走廊切除的办法

垂直地震剖面技术是一种很有潜力的高分辨率技术，由于地震波只穿越浅层（低速层）一次，所以比地面地震资料的常规地震的分辨率高得多。在资料处理过程中，通常采用交互走廊切除的办法



行高频率处理方式(图33),通过分析知道用高频率处理的VSP资料在垂直分辨率方面从浅层到深层都远远优越于地面地震剖面的分辨率。

五. 垂直地震剖面为地面地震资料处提供参数

1. 提供速度参数

VSP处理中精细的下行直达波初至时间拾取,是得到可靠平均速度、层速度及精确时-深曲线的基础。主要是通过垂直地震剖面下行波初至时的拾取和计算,得出标准地质层位的时间和深度,并相应地计算出各个反射波组的平均速度和叠加速度,进一步可以计算出地层的层速度,并可提供最终的数据表(表1),为地面地震资料的处理服务。另一方面是可提交静校正数据成果表,各井静校正量的求取,是为了与地面地震资料有较好的一致性,由于没有单井单点的静校正资料,因此在做静校正求取静校正量值时,利用处理三维地面地震资料所用的低降速带速度模型,进行各井的静校正量计算。泌阳地区Ho=3m,Vo=385m/s,H1=14m,V1=1550m/s,V2=2150m/s,根据这组参数,计算出各井静校正量如表2所示。需要说明的是,本数据表所列的静校正量值,系指震点(炮点)底至基准面+100米的静校正量值,并不是井口高程与+100米基准面高差的静校正量值,使用时需注意。

东10井零偏VSP测井计算数据表

表1

WELL : D10-ZERO-VSP		COMPANY : NYGC-VSP		Source	Source	Source	V. time	Vertical	Average	RMS	Interval	
Measured depth / DF (m)	Vertical depth / DF (m)	Receiver N/S (m)	Source E/W (m)	Source N/S (m)	Source E/W (m)	detector time (ms)	time detector (ms)	time detector (ms)	time / DF (ms)	velocity / DF (m/s)	velocity / DF (m/s)	velocity (m/s)
												2375
1466.7	1466.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	619.5	617.6	617.6	617.6	2375	2375	2020
1506.7	1506.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	639.2	637.3	637.3	637.3	2364	2365	2941
1546.7	1546.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	652.8	650.9	650.9	650.9	2376	2379	2649
1586.7	1586.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	667.8	666.0	666.0	666.0	2382	2385	3200
1626.7	1626.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	680.3	678.5	678.5	678.5	2397	2402	3509
1666.7	1666.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	691.6	689.9	689.9	689.9	2416	2425	3361
1706.7	1706.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	703.4	701.8	701.8	701.8	2432	2444	3308
.....											3846
.....											3846
2276.7	2276.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	862.0	860.9	860.9	860.9	2645	2700	3846
2286.7	2286.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	864.6	863.5	863.5	863.5	2648	2704	5263
2296.7	2296.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	866.4	865.3	865.3	865.3	2654	2713	3846
2306.7	2306.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	869.0	867.9	867.9	867.9	2658	2717	3125
2316.7	2316.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	872.2	871.1	871.1	871.1	2660	2718	2564
2326.7	2326.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	876.1	875.0	875.0	875.0	2659	2718	4762
2336.7	2336.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	878.2	877.1	877.1	877.1	2664	2724	4762
2346.7	2346.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	880.4	879.3	879.3	879.3	2669	2731	4000
2356.7	2356.7	0.0	0.0	59.9	-99.7	882.8	881.8	881.8	881.8	2673	2735	



泌阳凹陷 VSP 测井资料处理工作量及各震点(炮点)静校正量数据表 表 2

井号	井口地面海拔高程 (m)	静校正量 (ms)	备注
泌 191 井	150.56	33.662	震源零偏 VSP
		35.498	震源非零偏 VSP
EW17 井	139.76	28.000	炸药零偏 VSP
EW19 井	128.57	11.650	炸药零偏 VSP
泌 206 井	140	28.000	震源零偏 VSP
泌 212 井	136	27.774	震源零偏 VSP
泌 213 井	145	29.558	震源零偏 VSP
泌 193 井	149.54	31.354	震源零偏 VSP
		35.918	震源非零偏 VSP
泌 219 井	135	26.222	震源零偏 VSP
泌 208 井	132.8	11.726	电火花零偏 VSP
泌 194 井	136	27.226	震源零偏 VSP
泌 207 井	130	23.000	震源零偏 VSP
E 安 1 井	141.75	15.594	炸药零偏 VSP
E 王 1 井	148.57	19.170	炸药零偏 VSP
T404 井	120.78	20.110	震源零偏 VSP
新浅 15 井	123.94	8.182	炸药零偏 VSP

注:泌阳地区地面地震剖面基准面为海拔+100m.

六. 利用 VSP 下行波提取算子进行反褶积处理

常规反褶积的主要难题是地震子波未知,因此只好用统计方法估计子波,但精度受假设条件和噪声的影响,效果往往不理想,而 VSP 方法利用下行波可以观测到比较理想的子波。其原因是:①检波器安放在相对“安静”的井内,受噪声影响比较小;②记录到的下行波场能量强,通常比地面记录到的弱上行波能量强 10~100 倍(20~40 分贝),因此估计的地震子波也可以更精确;③ VSP 记录下行波的位置就在产生上行波场的界面附近,因此有可能最好地描述井旁地层剖面的多种关系。

利用 VSP 下行直达波可以观测到比较单纯的地震子波,设计出比较理想的反褶积算子,它要比从普通波(地面地震记录)中确定的反褶积算子精确度高,因为 VSP 下行直达波比地面地震记录能量高 20db 到 40db,且它所受噪声影响要少得多。在实际应用中,对质量较好且经过精确初至拾取的 VSP 资料(VSP 单次剖面),先进行上、下行波场分离,然后利用 VSP 反褶积,从下行直达波中提取出子波,计算反褶积算子,根据需要用计算的反褶积算子对上、下行波作反褶积处理,它可以消除下行波中的浅层交混回响等跟在直达



波后面的尾巴,改善下行波记录的面貌;对上行波,可以消除不同周期的多次波,压缩子波波形,提高分辨率,改善记录面貌。将用 VSP 资料计算(设计)出的反褶积算子,应用到井旁地面地震记录中,可以改善记录反褶积的效果,提高地面地震记录的分辨率。

高分辨率地震勘探是目前地震勘探的发展方向,反褶积是资料处理过程中提高分辨率的一项关键技术,利用 VSP 资料设计的反褶积算子对地面地震记录做反褶积,能衰减记录中的多次波,提高记录的垂向分辨率。图 34 为过焉 2 井的地震测线,用常规地震处理方法(统计法)提取的子波计算出反褶积算子做反褶积,所获得的剖面;图 35 为用 VSP 方法提取的子波计算出反褶积算子做反褶积,所获得的剖面。显然,利用 VSP 技术提取的反褶积算子对地面地震记录做反褶积处理出的剖面,同相轴压细了(提高了垂向分辨率),层间多次波(强轴下的尾巴)被压制掉,浅层和强轴下面的弱轴得到了加强,且连续性变好,剖面的整体面貌有明显改善。

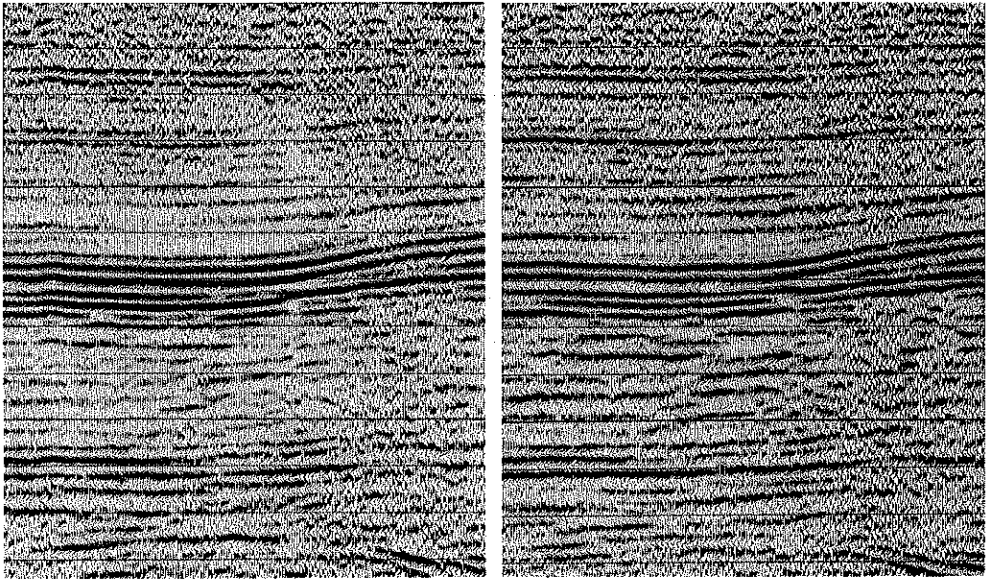


图 34 统计法提取的子波算子作反褶积的剖面 图 35 VSP 技术提取的子波算子作反褶积的剖面
七. 采用新老技术进行处理效果对比

通过对原来采集的泌阳凹陷 EW17 井的 VSP 资料进行重新处理并与原来处理的剖面效果做以对比,可以发现现有技术处理的 VSP 资料效果不管在连续性,信噪比方面,还是在分辨率和地质层位标识方面都有长足的优点和进步,地质层位的对比良好,斜井覆盖段的递变清楚,能量分布均匀,可比性强(图 36 和图 37)。

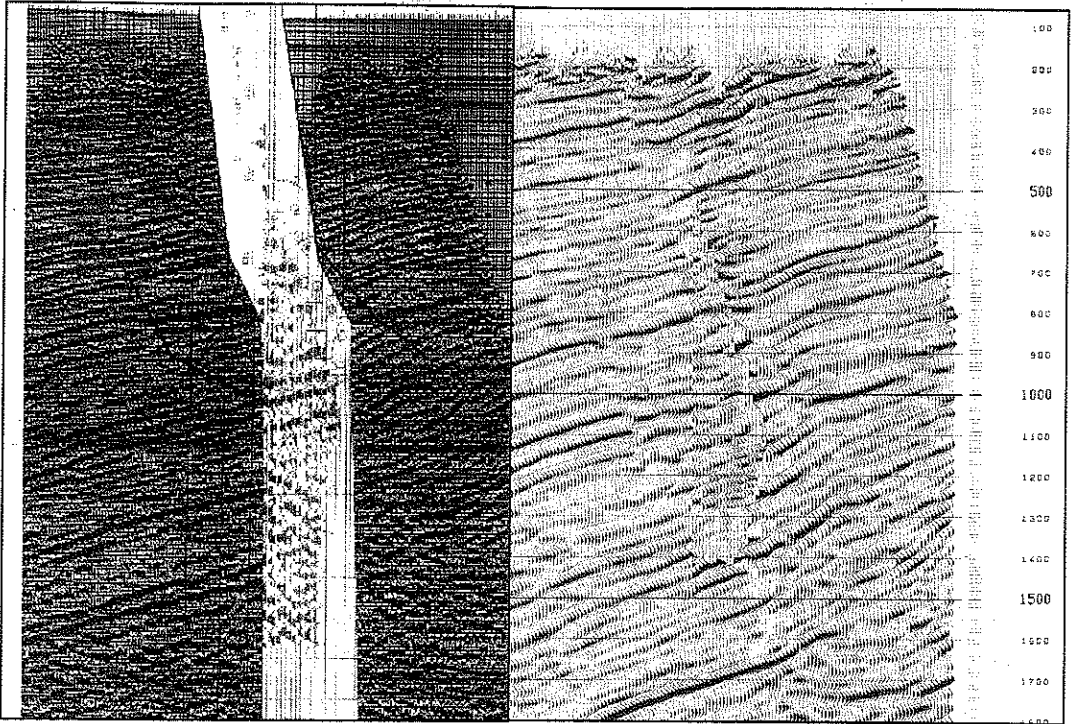


图 36 原处理的 BW17 井 VSP 剖面

图 37 新处理的 BW17 井 VSP 剖面

八. 垂直地震剖面在开采和钻探工程中的应用

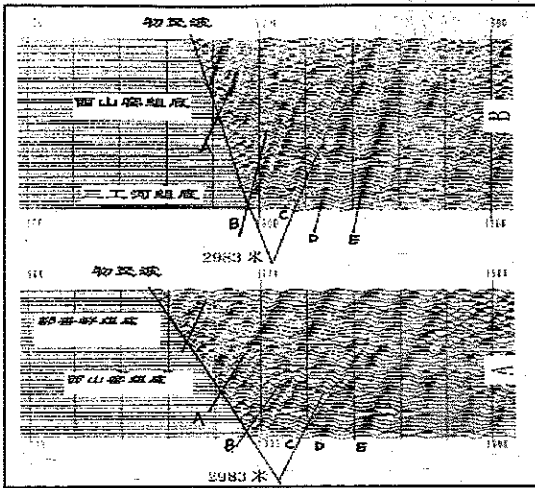
垂直地震剖面在开采和钻探工程中最大潜力的应用分为三个方面:

①查明井遇前方的情况。钻探期间,在钻头达到之前先行观测,垂直地震剖面可证实地震解释成果,以进行钻探预测。垂直地震剖面可作为一种有价值的研究手段和对干井作事后研究,以改善解释能力和地震资料处理的方法。在深井记录时,用垂直地震剖面所得井底之下的反射层的信息,其研究深度往往比地面地震资料可能研究的深度大得多。

②从钻井中向侧面观测。

③取得由偏移井提供的记录的几何条件的改变。

这里只提供第一条的应用实例,其它两项有待于进一步研究和探索。用 VSP 资料预测未钻遇地层及标定地震层位是根据 VSP 资料可以预测井底钻头下方目的层深度,预测深部地层的岩性特征,标定井中反射层位,它能够帮助钻探人员和勘探人员决定应该选择的钻井泥浆比重、钻头类型、进行地层测试的井段及是否应该继续钻探或终止钻探等。要实现这种预测和标定,较简单的办法是将 VSP 记录的初至下行直达波同相轴和一次反射波同相轴按照它们在井底以上的趋势向深处延伸(或外推),两同相轴相交的深度就指示井底反射层的深度;对于井中层位标定,只须找到反射层同相轴与初至下行直



38 用焉 2 井的 VSP 资料预测井底地层标定井中层位 预测深度约为 2983m。

达波同相轴的交点，即指示对应反射层的深度。在这里用 焉 2 井的实测 VSP 资料为例来分析说明。焉 2 井的实际完钻深度 3144.3m，VSP 测井深度 1910—2730m，我们对该井已作过 F-K 滤波等处理的 VSP 资料进行分析研究，在图 38 中，图 A 是焉 2 井 20m 道距、1—42 道对应深度 2730—1910m 的 VSP 记录；图 B 是该井 10m 道距、1—49 道对应深度 2730—2250m 的 VSP 记录，按照上述方法可知地层 C 的未钻前方图

第七章 垂直地震剖面一体化技术研究的结论和建议

第一节 垂直地震剖面一体化技术应用成果结论

垂直地震剖面通常与声波测井资料和密度测井资料及常规速度（检査炮）的测量结果进行对比和比较。速度测量通过在井下各层顶面记录来自地面震源的初至信号为地震资料提供精确的时—深函数，其地层间隔大约是 500—1000 英尺量级，且仅记录直达波（初至信号）。常规声波测井用频率为几千赫的声源在井中以 1 英尺的间隔为地球物理学家提供层速度估计。声波测井曲线由深度换算成时间、用速度测量标定并用于计算模拟井附近一次地震反射的合成地震记录。而垂直地震剖面可借助于在深处记录的地震震源信号，包括直达波和地震反射波，提供瞬时深度和时间关系，它可提供每波长（50—100 英尺）内大约两个点的时—深关系的优质速度细测。它在地震频率范围内所提供的层速度受井中局部变化的影响较小，至关重要是垂直地震剖面能够测量井眼附近的深层地震反射特征。

垂直地震剖面可提供精确的时—深测量，并可在震源频率范围内估算地震速度。这种地震反射测井图可直接与按深度测量表示的测井资料和钻井资料进行对比。借助精心的采集和真振幅恢复处理，垂直地震剖面可提供井眼附近的高分辨率的地震反射信息。由于这些反射是直接测量结果，它将为合成地震记录的制作提供必要的刻度。通过对垂直地震剖面的衰减测量方法和声波测井、垂直地震剖面 and 共深度点资料之间时差关系的不断研究，将会很快地提高对地震波传播机理的理解和认识，同时可改善地震模型的设计方法。VSP 资料包括丰富的地下地层的信息，一些可直接用于估价井穿越的地



层使用更多的信息与地面地震资料剖面相联系,提高地表测量剖面的价值和解释的能力。

垂直地震剖面在井中每个最短的期望地震波长内应该至少记录两个点。当在套管井中能够获得最佳的垂直地震剖面检波器响应和最高信噪比时,其最佳测量方法是在裸眼井中同时进行垂直地震剖面测量,这样可大大减少测井次数。对震源的主要考虑是应该使能量和带宽达到最大,由此而使在每个深度点处激发的次数最少,且震源必须是可重复的并能监视它的波形变化。垂直地震剖面应该具有质量控制,以使噪声和各深度点之间的波形变化减到最低限度。

通过对地震脉冲演变的研究,对虚反射和多次波的研究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用途的。垂直地震剖面为评价地面地震资料提供一种参考资料,可有助于识别多次波、解决反褶积问题、解决相位和振幅问题,以使速度误差减小。

常规测井在深度上具有的垂直分辨率可提供所需有关储层及其地质情况的详细资料,然而它只能提供被钻头钻穿且在井眼附近几英尺的地层。解释上趋于把所有的测井资料、钻井资料与地面地震资料综合在一起,以弥补这些数据采集之间信息的缺失。

通过对泌阳凹陷和南阳凹陷部分 VSP 的新老采集资料的处理和解释,其中包括不同类型的震源(可控震源、电火花和炸药震源)及不同偏移距(零偏移距和非零偏移距)和不同观测方式(直井、斜井和移动观测)等资料的综合分析和对比,可得出如下的研究成果:

(1) 层位标定结果:零偏 VSP 走廊叠加剖面、非零偏 VSP 叠加剖面与过井地震剖面相邻地震道具有较好的相关性,主要目的层的底界与地震剖面的强轴相对应,层位吻合较好。

(2) 由于设备和技术的更新,采集较晚的资料要优于采集较早的资料;

(3) 激发方式方面,可控震源和电火花震源采集的资料要优于炸药震源采集的资料。由于使用炸药的炮井深度不能保持一致,采集的资料一致性稍差。

(4) 使用炸药震源激发时,小药量激发的子波的主频约为 80Hz,主能量集中在 30-120Hz 频段,但低频成份能量较弱。地震波能量与炸药量之间仅存在抛物线型关系是不全面的。

(5) 从理论到实践都足以证明:VSP 采集·处理·解释一体化技术的综合利用是保障垂直地震剖面质量准确可靠的唯一办法,也是 VSP 技术发展的总体趋势。

第二节 效益分析

本项目的研究和应用取得了一定的经济效益和社会效益。在经济效益方面,为验证新的处理系统的应用效果,通过安排新探井进行 VSP 采集,结果



证明 GEOVECTOR PLUS 7100 系统具有良好的处理效果, 为此勘探局要求将过去所有已测的 VSP 老资料进行了重新的处理并进行了二次解释, 创造利润累计 62 万元。在社会效益方面, 首先统一了 VSP 的采集、处理和解释的管理, 由原来的分散管理转变成集中管理, 由粗放式的经营变成集约式的经营。通过实践证明将以前 VSP 野外采集单位、计算中心和成果解释单位三者融合一体是有益的, 既有利于 VSP 总体质量水平的提高, 也有利于科学研究工作的开展, 同时也简化了管理程序。

第三节 垂直地震剖面应用建议

1. 勘探地震学的基本组成包括压缩体波和切变体波的形成和反射, 以及记录和分析等多方面内容。在陆地勘探中瑞雷波和拉夫波自震源沿着地表向四面八方传播, 当布置在地表上或者靠近地表上的检波器记录到它们时, 深部反射体波就可能掩盖。在 VSP 中令人最感兴趣的界面波是斯通利波, 当波数值特别小的时候 (甚至为 0), 斯通利波存在于常规的钻孔中, 这类波的波长与 VSP 测量波长范围相同, 在整个充满液体的钻孔中传播的斯利波就是本文所说的“管道波”, 因为它们使“震源”能量沿着充满液体的钻孔的轴线传播, 只有很少能量漏失到地层中, 况且管道波也不象体波在各个方向上球形扩散, 因此管道波也不像纵波和横波一样随着传播距离明显衰减。随机噪声干扰可通过重复激发减弱来增强有效信息, 而多次激发则会因激发子波一样而加强了管道波。为此 VSP 采集中必须考虑震源能量的大小、布设位置及组合方式的选择。
2. 为使 VSP 垂直地震剖面经济有效, 使垂直地震剖面采集方法最佳化, 处理资料时应该尽可能从垂直地震剖面中获得更多的信息, 以使测量成本合理; 采集设计时必须考虑的因素应包括检波器的深度采样间隔、所测的井段、钻井设计、地震震源及所需能量、井中噪音问题、该区和该井的地质和地球物理目的。
3. VSP 资料的缺陷: 有时成像的水平距离太小, 野外操作方法不当, 或处理资料时选择的软件不当, VSP 资料的价值就会下降。要知只有“质量良好的”VSP 资料才能与地面地震一次反射波进行很好的对比。
4. 建议强化垂直剖面地震配合地面地震地层勘探的综合研究。
5. 一般认为 VSP 近源场的半径应该远小于近源场内地震波的波长, 近源场检波器就应该放置在这个范围内。影响近源场子波的一致性的因素是近场检波器和震源, 试验中建议: 1) 把近场检波器埋置在地下比地面要好 2) 每个近源场检波器到震源的距离一定要相等 3) 近源场检波器的埋置深度应该相等 4) 始终保持近源场检波器与地层的紧密耦合 5) 震源和近源场检波器的位置必须测量准确。
6. VSP 是地面地震剖面、测井和钻井勘探的桥梁, 应用中一定要同三者紧密



结合起来,使VSP资料成为真正的“纽带”。

7. 尽量采用多偏移距激发、三分量接收,充分利用各种转换波及相关信息来研究地下岩性变化;建议加强三分量垂直地震剖面工作的研究,重点是分析观测质点运动的铅垂角和其在解释构造、速度和各向异性变化中的应用。
8. 发展横波震源,特别是激发的震源子波重复性好的横波震源和有利于激发SH型(水平横切)横波的震源,从而可以利用纵、横波经地层传播后速度、极性的差异来研究地下岩性的分布。

致 谢

毕业论文完成过程中,石油大学(北京)朱筱敏教授、陈小宏教授在理论上给予耐心指导和辅导,河南油田地调处处长、物探高级工程师黄成国在具体研究工作中给予大力支持和帮助,并对论文进行了认真审阅,肖都建物探高级工程师在资料处理具体过程中给予热心的帮助,对专家和领导的帮助我一并致以深深的感谢,并表示真挚的谢意。

参考文献

- | | | |
|------------------|-----------------|----------------|
| 《垂直地震剖面》 | 《油气勘探译丛》编辑部 | 石油工业部科学技术情报研究所 |
| 《垂直地震剖面方法》 | 朱光明 | 石油工业出版社 |
| 《炸药激发子波信号的记录与研究》 | 汪恩华 贺振华 李庆忠 | 石油地球物理勘探编辑部 |
| 《地震测井》 | 谢明道 | 石油工业出版社 |
| 《地震勘探原理》 | 陆基孟 | 石油大学出版社 |
| 《地震勘探资料数字处理》 | 牟永光 | 石油工业出版社 |
| 《垂直地震剖面》 | BOB. A. HARDAGE | 煤炭工业部地球物理勘探研究所 |
| 《垂直地震剖面法应用技术》 | 谢明道 | 石油工业出版社 |
| 《石油勘探开发技术》下册 | 常子恒主编 | 石油工业出版社 |
| 《走向精确勘探的道路》 | 李庆忠 | 石油工业出版社 |