

第五章 三维地震勘探及垂直地震剖面法（9 学时）

三维地震技术的兴起是在 70 年代末，正值世界范围内出现石油供应紧张的尖锐矛盾时期，当时由于二维地震方法的局限性，即使仅复加密测线、增加覆盖次数，也难于查明较复杂的油气田地地质问题。因此，钻探成功率很低，或本人幅度上升。在这种形势下，已经从试验阶段发展到理论与实践都较成熟的三维地震技术得到了迅速发展。与此同时，适应于三维地震勘探的技术设备——多道数字仪和大型数字处理计算机的发展，也为三维地震技术的发展创造了必要条件。从此以后，地震勘探技术进入了一个全新的水平。由于三维地震具有高密度，三维空间成像归位以及多种灵活的显示方式等优点。因此，外已卓有成效地用于查明各种复杂地质结构和陷蔽油气田。

地震勘探的目的是通过地震观测获取反映地下界面真实位置和地下岩性、物性等地质信息。然而，二维地震观测只能获取反映 (x,t) 平面内的地质信息。即使在实际生产中，二维观测有时也在地表按面积布置测线，但每一条测线都是按二维采集数据并按二维偏移处理。由于二维偏移是沿着测线的视倾角方向进行的，偏移结果不完全，也不准确，尤其对于地下复杂的地质构造进行二维地震勘探。二维归位处理就不能反映地下界面的真实产状。

三维地震采集的数据是一个三维数据体 (x,y,z,A) ，三维偏移是 进行的，各点都是按照它们真倾角方向偏移。因此可以回到它们各自的位置上去三维偏移的结果与真深度是一致的。

在国外，自 1974 年 W.S.FRENCH 用三维模型实验有力地证明了“只有 ”观点和方法研究地下三维问题，才能得出对于地质结构的全面正确认识，这一著名的模型试验结果引起了地震界同行们的广泛重视，从而开始三维地震技术的理论到实践的不断探索历程。

此后，美国地球物理服务公司（GSI）、西方地球物理服务公司、西德普拉克拉塞兹其斯（Prakla-seismos）地球物理公司、普劳塞路（Proussag）石油天然气公司等为解决复杂地震地质条件下的构造问题，首先开展了三维地震工作，采用这种技术公司还有埃克森、阿莫科、壳牌、德士古和黑西哥国家石油公司等，经过近十年的努力，大量的实例证明，三维地震在解决复杂地质问题以及在油气回开发的作用，无一例外地都收到了二维地震无法比拟的地质效果和经济效益。

三维地震勘探与二维地震勘探相比有以下几方面的优越性

- 1、三维数据采集不存在二维数据采集时来自非射线平面内的侧面反射波。
- 2、三维采集的数据按三维空间成像处理，可以真实地确定反射界面的空间位置。
- 3、三维观测可以避开地形、地物的障碍，对地表条件适应性很强。
- 4、三维观测可对 有更大的保真度，相位数据更齐全，便于研究地层的岩性。
- 5、三维地震勘探资料的完整统一性及显示技术的现代化，更便于人工联机解释。

例如：美国在墨西哥湾近海所作的 28 个区块的三维地震工作，总投资 1500 万美元，相当于钻研 3-5 口井的费用。

美国加利福尼亚州费布霍克气田、由于地面为果园，二维无法施工，而三维对于复杂的地表条件，炮点和接收点线的布置有很大的灵活性，采用公路、大路、小路布置闭合圈观测，发现了 30.2km^2 储量为 1 亿立方米的气田等等。

由于三维地震勘探效果显著，近八年国外三维地震技术的发展极为迅速，国内也取得了一步

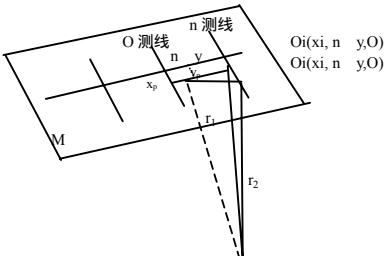
成功。

第一节 三维地震勘探的基本原理

当前三维地震勘探是用反射波法进行的。二维反射波存在基本原理上有许多相似之处，二者所不同的是三维地震震高密度的、各种形式的面积观测系统。所以三维地震又叫面积观测法，下面简单介绍面积观测系统的反射波时距图。

一、面积测量系统反射波时距图

根据物理地震学的原理，地震波从炮点 O 激发后，以球面波方式向下传播，碰到反射界面后，根据惠更斯原理可以把反射界面上每一个点看作是一个新震源。再从新震源发出一系列小的球面波，向四面八方传播开来，对地面某个接收点来产，它所接收的反射波就是一系列来自反射界面的波的总和。



我们可以研究地下任意点 P 所产生的波在地面上分布的情况。设在地面 M 上布置 n 条测线，用普通排列接收地一任意绕射源 P 的反射。设线路为 nxy，如果在 n 测线上的 Oi 点放炮，s 点接收，则来自 P 点绕射波时间 t，是由 Oi 到 P 的路径 r₁ 及 P 点到 S 点的路径 r₂ 所决定，若 Oi 点和 S

点都在大地水准面上，即 Z=0，H 为绕射点的深度。

由 Oi 到 P 点的路径 $r_1 = \frac{H^2 + (X_i - X_p)^2 + (n \ y - y_p)^2}{2V}$

由 P 点到 S 点的路径 $r_2 = \frac{H^2 + (X_s - X_p)^2 + (n \ y - y_p)^2}{2V}$

P 点绕射波到达时间为： $t = \frac{r_1 + r_2}{V} + \frac{1}{V} = \frac{H^2 + (X_s - X_p)^2 + (n \ y - y_p)^2}{V^2} + \frac{H^2 + (X_s - X_p)^2 + (n \ y - y_p)^2}{V^2}$

为了书写方便，将 Xi 写成 X 则 $t = \frac{(\frac{t_o}{2})^2 + \frac{X_i^2 (n \ y)^2}{V^2}}{V^2}$

由此可见，面积测量反射及时距图为极小点在 P 的旋转双曲面。

二、折曲测线观测系统反射波时距图

有的地区由于地表条件受限制，为了完成地震勘探任务，往往把测线布成折曲测线，波状测线及环形测线。这类测线的基础是弯曲测线，弯曲测线的时距方程为：

$t = \frac{1}{V} \sqrt{(2H)^2 + l^2} + \sqrt{t_o^2 + (\frac{1}{V})^2}$ l—炮检距

若已知激发点 Oi 及接收点 S 的平面坐标则 $l = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2}$

$t = \sqrt{t_o^2 + \frac{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2}{V^2}}$

xi,yi——激发点 Oi 的纵、横坐标

xs,ys——接收点 S 的纵、横坐标

由上式可见，弯曲测线反射波时距曲线是一条与激发和接收点的平面坐标有关的，复杂的空间曲线，不管曲线多么复杂，只要能数学方式模拟，就可通过方程的方法把反射界面研究下来。

三、共反射面元

面积测量和折曲测线观测系统的三维多次覆盖技术不能严格遵守共反射点叠加的定义，必须给予新的含义，实际的共反射点道集随着测线的改变或测线弯曲会有一定的离散，围绕着理论共反射点位置的这些实际的地下共反射点道集，称为“共反射面元”。

“共反射面”叠加，是指“共反射面元”道集内各反射点信号的叠加，叠加结果应该象来自同一反射点那样使信号得到加强。

共反射面元的大小可以限定，一般取小于接收点距之半为共反射面元的线性长度 $D \leq \frac{\Delta x}{2}$ 共反射面元的密度。其方向一般沿着构造走向故 $D \geq D_x$ 凡满足两式的就可属于“共反射面元”道。这些道的集合构成共反射面元道集。另外，“共反射面元”道集内的各道还需要一个附加条件，即它们之间的最大时差 Δt_{\max} 不得超过 $1/4 \sim 1/6$ 周期，这样才能保证达到同相叠加即：

$$\Delta t_{\max} = \frac{1}{v} \left[\sqrt{P_x^2 (\sin^2 \Phi_x + \sin^2 \Phi_y) + D_y^2 (\sin \Phi_x + \sin \Phi_y)} \right]$$

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{1}{4} \leq \frac{1}{6} \text{ 周期。 } D_x, D_y \text{——共反射面元的边长。}$$

Φ_x, Φ_y ——反射界面沿 x, y 轴方向的倾角，凡满足时间与空间条件的地震道无疑可以叠加在一起，使反射波加强。

第二节 三维地震野外数据采集

三维地震野外数据采集是一种面积接收技术。其观测系统的设计及参数的选择都要考虑三维特性。因此，三维数据采集比二维复杂，质量要求也高，需要进行理论模型试验，并结合野外试验选择合适的参数和方法。

一、 三维地震工区的确定

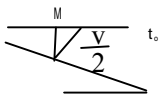
主要是根据地下地震、地质条件和地面地形地貌条件，并以前者为主，工区的观测面积要根据构造的大小，目的层的深度和倾角走向来决定。决定工区观测范围时还要考虑需要满足，覆盖的次数的地下范围和偏移前后数据上有空间的不同。

1、 地下满足覆盖面积的确定

地下满覆盖面积（即地下勘探面积）可预先根据有利地区的范围，在以往的二维构造图上粗略确定，然后考虑降低勘探成本，工作规化整齐等因素，最后确定地下满覆盖面积。

2、 偏移范围的确定

地下满覆盖面积初步确定后，应考虑各目的层由于向工区外倾斜的倾角引起地面接收范围的扩大。这个扩大的范围——偏移范围（即四周镶边的宽度），偏移范围也可以理解为倾斜地层（反射同相轴）左偏移处理中使其恢复到正确的地下位置所应移动的水平距离。对于一个倾斜反射同相轴进行偏移时的最大不平距离 M



$$M = \frac{v}{2} t_o \sin \Phi$$

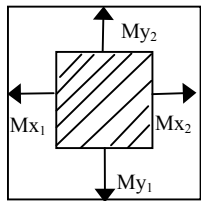
——最深目的层的最大倾角

根据此公式计算出探区四周应偏移的范围

3、 地面施工范围的确定

地下勘探面积和偏移范围确定后，地面施工范围 S 由下式计算：

$$S = [L_x + M_x + L_{1x} + L_{2x}] [L_y + M_y + L_{1y} + L_{2y}]$$



工区四周镶边宽度

式中 L_x, L_y ——地下勘探面积的长和宽。

M_x —x 方向两个界最深目的的层的偏移距离（镶边宽度）之和 $M_x=M_{x1}+M_{x2}$

M_y —y 方向两个界最深目的的层的偏移距离（镶边宽度）之和 $M_y=M_{y1}+M_{y2}$

L_{1x}, L_{2x} —沿 x 方向两端时附加段长度

L_{1y}, L_{2y} —沿 y 方向两端时附加段长度

$$L_{1x} = (n_x - 1)\Delta x_s + \frac{x_{\min}}{2} \quad (1) \quad L_{1y} = (n_y - 1)\Delta y_s + \frac{y_{\min}}{2} \quad (3)$$

式中

$$L_{2x} = x - (\frac{x_{\min}}{2} + \Delta x_s) \quad (2) \quad L_{2y} = y - (\frac{y_{\min}}{2} + \Delta y_s) \quad (4)$$

n_x —沿 x 方向（纵向）叠加次数

Δx_s 炮点距

x—最大炮检距

x_{\min} —最小炮检距（偏移距）

n_y —沿 y 方向（横向）叠加次数

Δy_s —横向排列线站

Y—横向最大炮检距（最大外纵距）

y_{\min} —横向最小炮检距（最小非纵距）]

炮点在接收浅范围以外的三维观测系统采用（3）式计算附加段长度

炮点在接收浅范围以内的三维观测系统采用（4）式计算附加段长度

二、三维地震观测系统

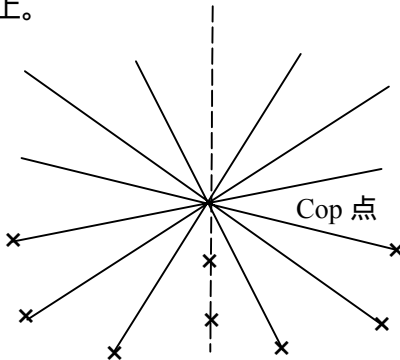
三维数据采集中观测系统的类型和参数设计非常重要，它关系到整个数据采集的质量。因此在设计时，应根据地质任务要求，综合考虑地形、地物、交通条件以及装备等各种因素，选择最优化参数来合理设计观测系统。

（一）观测系统的设计原则

1、在一个共炮点道集式一个共 cop 道集内地震道应均匀分布。

即，炮点距、道间距一般均匀分布，布保证同时勘探浅、中、深各目的层。即能取得各反射层的有用反射波信息，又能用来进行速度分析。

2、在一 cop 道集内各炮检距连线的方位方向应当尽可能比较均匀地分布在中心点的 360° 的方位上。



如果纪念品某一方向特别密集，三维的优点不能发挥

图 5.2.3

3、地下各点的覆盖参数应尽可能相同，保证叠加参数相同。

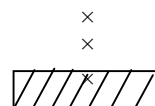
均匀的覆盖参数是保证反射记录振幅均匀，频率均匀的前提，从而保证地震记录特征稳定，便于岩性、岩相研究。

（二）观测系统的类型与选择

规则型：地面施工条件好，无施工障碍的地区

不规则型：地面施工条件不好，有施工障碍的山区、水泡等。

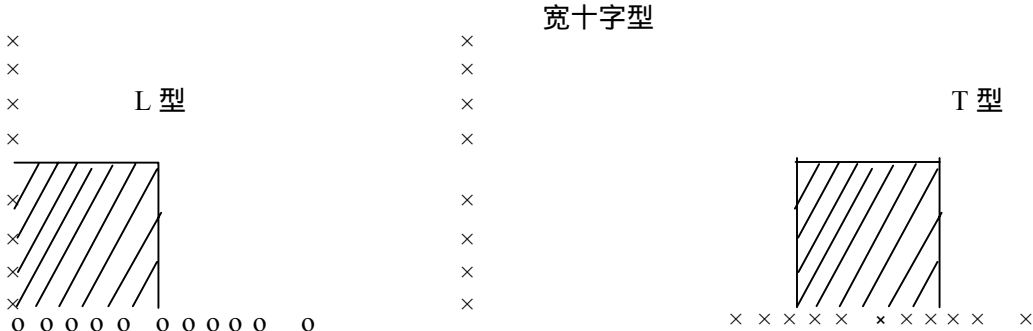
规则型观测系统：炮点和检波点按一定的规律有规则的分布，我们介绍几种基本的和



常用的。

(1) 十字型观测系统

由此衍生成 L 型、T 型



这类观测系统可将地下网格面积分布在需要勘探的地区，哪湖泊、村镇等。在进行小面积三维观测时，用多道仪器，多个炮点即可完成野外采集。

施工时，接收点排列不动，炮点沿炮线逐点激发。缺点是：单次覆盖

地下覆盖面积
$$\frac{1}{2}(s-1)\frac{1}{2}(R-1)\Delta x\Delta y = \frac{1}{4}(s-1)(R-1)\Delta x\Delta y$$

(2) 组合型观测系统

从炮点和接收点分布关系上，可基本分为垂直型、平行型和斜交型三类。

1) 垂直型观测系统

该系统一般由十字型观测系统组合或衍生而来，主要有直式栅状系统和地震浅速观测系统。

可作为小面积三维观测网，将下网格面积颁在需要勘探的地区。

地震浅束观测系统是目前三维地震大面积施工中最常用的类型，该系统是由多条平等的接收排列和垂直的炮点排列组成。

其基本的形式如下：

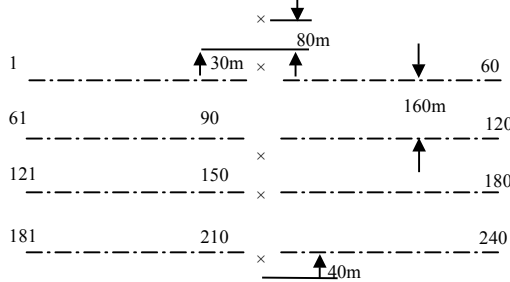
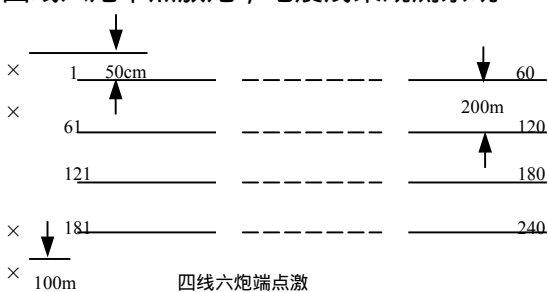


图 5-7

四线六炮中点放炮，地震浅束观测系统



四线六炮端点激

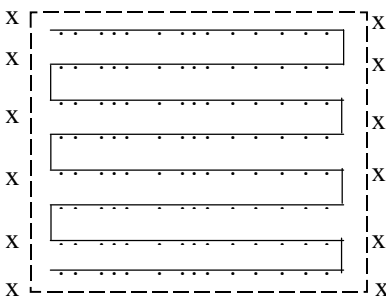


图 5-6

野外观测时，一排炮点逐点激发后，炮点排列和接收排列同时沿前进方向滚动，再进行下一排炮点的激发，直到完成整条线束面积，然后垂直于原滚动方向整个移动炮点排列及接收排列，重复以上步骤进行第二束线、第三束线.....的施工直至完成整个探区，面积的观测。

这种观测系统的优点：可以获得从小到大均匀的炮检距和均匀的覆盖参数，适应于复杂地质条件三维的地震勘探。此外在多居民点、多农田地区可改变偏移距和发炮方向进行施工，亦可获得满意的资料。

我国有些地区 1982 年~1984 年初采用四线六炮线束系统，但它们存在着缺点：四线六炮中点放炮观测系统。炮点两侧接收道数仅各 30 道，采用 80m 道距。虽然最大炮检距可达 2400m 左右或更大一些，但对于地下条件复杂的地区。显然采样点密度不足，而采用 50m 道距，炮检距又过小，不利于中深层勘探。因此，1984 年后，这种观测系统被四线六炮端点放炮系统所取代。

该系统采用 50m 道距，排列长 2950m，但在地面障碍较多的地区，炮点可能地有较大的偏移。此时炮检距往往可达 3500~4000m，甚至更大。过大的炮检距会影响浅、中层记录品质。同时也极不便于野外施工。



图 5-9 六线四炮

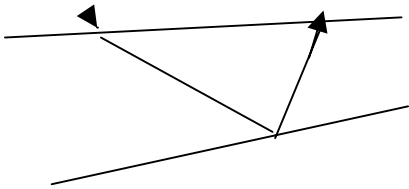
为此，1996 年以后，使用了六线四炮。该系统有以下优点：

一是排列长度适中，每一排列 40 道，长 1950m，当勘探目的层深度有较大变化时，可改变偏移距来满足不同地质任务的要求，并且在居民点及工业设施等障碍区，炮点有较大的可移动范围，有利于提高采集质量，便于施工。

二是具有较小的最大非纵距（即横向最大炮检距 y ）不仅相应地减小了非纵观测误差，而且测线与非纵炮检方向（地震射线方向）之间的夹角相差较小，在检波器较少的情况下便于组合设计和提高组合效果。

三是在相同的勘探面积内，此种系统罗四线六炮点数量少 1/3。因此，相应地减少了压地面积并降低了农业赔偿费。

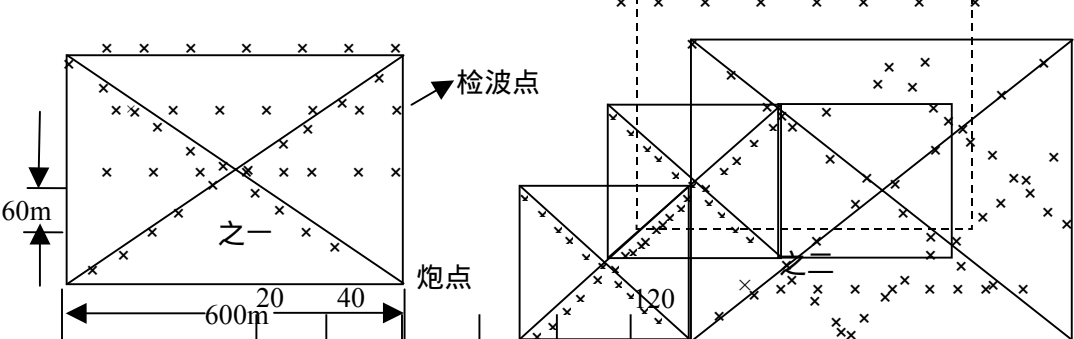
还庆提出：在地下构造起伏变化大的地区，观测系统的设计要保证陡地层、陡断面的下倾激发，上倾接收。



最好使用 480 道以上的多道仪

2) 平行线型布置 炮点

3) 积木型（又称斜交型）炮点线与接收点线彼此斜交



单积木型

组合积木型

覆盖参数 $n=n_x \cdot n_y$

$$d = \frac{NK}{2n_x}$$

4) 路线型 (宽线剖面)

沿测线布置之不置检波和炮点,可以得到测线 的反射资料。宽线剖面处理后,能确定地下反射界面的位置、倾角和倾向,分析波的来源, 剖面信号比。

1、不规则型

不规则型观测系统仅适用于地表障碍物多,能行条件差,不能接正常观测系统施工的地区,可根据地面条件和地质任务的要求设计成各种类型如:

不规则型观测系统的优点是灵活机动,放炮时炮点和检波点位置选择灵活方便,但它们有以下共同缺点。

叠加次数一般较低,而且不均匀。

炮检距变化范围一般较小,仅在个别占上有从小到大比较完跑距

资料处理比较复杂。

由于存在上述问题,不规则型观测系统一般只用于通告条件困难的地区,并且仅在信批同的地区才能得到较满意的结果。

三维观测系统的选择是一个十分重要的问题,它会直接影响成果质量。尤其在大面积障碍区进行施工,选好观测系统更为重要。

三、三维地震数据采集参数的选择

在三维观测系统的基本方式确定以后,要根据三维工区的南质的地球物理特片,计算和选取各种采集参数。这些参数包括道距、排列线距、爆炸线距,最大炮检距、最小炮检距,总覆盖次数。检波器或炮点的组合形成及特性计算等。三维地震采集参数与二维地震采集参数的计算和选择原则基本相似,但是三维地震采集参数有其自身的特点。

1、与参数计算及选择有关的地质——地球物化条件

(1) 地层倾角与构造走向

勘探目的层的倾角是采集参数计算和选择所必须知道的因素。当然,并不要求准克的知道各个地层的真倾角和构造走向,但就当知道最在的倾角限度和主要构造走向。地层倾角可由二维地震剖面来估算做为 $\Phi = \arcsin \frac{1}{2} V \frac{\Delta t}{\Delta x}$ 构造走向可由以前的地震构造图示地质图来确定。

(2) 在计算各种采集参数时都会用到速度,速度参数可取自二维地震速度谱的速度数据以及用测井和声波测井数据计算的各种速度参数。

(3) 地震波的最高频率和垂直分辨率

在计算野外采集的参数时,希望在地震记录中储存很多的高频万分,但这是难以做到的。因此常常从地质任务出发,要求保存最起码的最高频率 f_{\max} 或最短波长 λ_{\min} ,最高频率可由下述方法计算的。

设要分辨的最小地层厚度为 z , , 层速度为 V_z

$$\Delta z = \frac{\lambda_m}{4} = \frac{V_z T_m}{4} = \frac{V_z}{4f_m}$$

对于具有 $\sin C = \frac{\sin \pi t}{\pi t}$ 的相位子波，主频 f_m 和最高频率 f_{\max} 有下列近似关系：

$f_{\max} = 1.43f_m$ 代入上式得

$$\Delta z = \frac{1.43V_z}{4f_{\max}} \quad \therefore f_{\max} \approx 0.358 \frac{V_z}{\Delta z}$$

相应信号呈的最短波长应为 $\lambda_{\min} = 2.80 \Delta z$

(4) 地震波主频与横向分辨率

$$\text{菲涅尔带半径 } L = \frac{t_o v^2}{4f_m} + \frac{\lambda^2}{16} \quad \text{当 } \lambda \ll h$$

$$\begin{aligned} \text{得 } f_m &= \frac{t_o}{4} \left(\frac{V}{L} \right)^2 \\ f_{\max} &= 1.43f_m \end{aligned}$$

(5) 勘探目的层的深度范围

最浅的目的层和最深的目的层哪个深度上是确定最在和最小炮检距的有用参数。

(6) 根据地质剖面 and 以前的地震工作，可对工区的岩性分段，反射参数大小及变化作一初步估计，这对确定覆盖次数有参考价值。

(7) 震源产生的干扰波及环境噪声

应当在设计采集参数之间做干扰波的调查工作，并了解浅层析射波的情况。这对于确定覆盖次数和组合参数、设计都是必要的。

2、空间采样距离的选择

空间采样距离，是采集三维资料时，对地震波进行接收的空间间隔。当地质体空间三个子交方向（ x, y , 及时间 t ）的采样密度均满足采样定理要求时，得到的数据体才有意义。因此，为了保证所有反射有意义，在三个方向上都必须有足够的采样密度。

空间采样距离：对于二维指道间距（ Δx ）对于三维指道距和测线距道间距与二维相同，指沿测线方向的采样占距。测线是指沿垂直于测线方向的采样三距。

三维空间采样密度用地下共深度点（cop）网格面积（ $\Delta x, \Delta y$ ）的大小来讨论较为确切。 Δx 表示沿测线（ x 方向）方向的(cop)点距， Δy 表示沿垂直于纵测线方向（ y 方向）的 cop 点距，它们分别是沿 x 方向对波剖面数字化的地下采样占距。必须在这两个方向都满足采样不定期理要求时，才能获得完整的容采样频率。否则，将产生空间假频干扰。

通常设计 Δx 和 Δy (cop 网格)的方法是先确定纵向道距 Δx , 则 $\Delta x = \frac{\lambda_x}{2}$ 然后根据地区地质任务和讨论要求确定 Δy , 因为 Δy 方向一般是沿着构造走向的，所以一般 $\Delta y > \Delta x$ 根据采样定理，为了使道距的选择不产生空间假频，在不存在相平等情况下，

$$\Delta x \leq \frac{1}{2} \lambda_{\min} \quad (1) \quad \min \text{ 信号最小频波长 (沿测线方向的波长)}$$

$$Dx = \frac{1}{4} \lambda_{\min}^* \quad (2) \quad x \text{ 可选用的最大纵向道距}$$

即：Dx—可选用的最大纵向 cop 点距

如果存在明显的相干噪音，则对噪音的采样必须不把噪音的假频引入信号的频谱中。其目的是为了能在资料处理中消除面波干扰（保证不产生面波的假频）。因此要求道距 x 必须小于干扰波最大视波长的一半（对于低视波长的干扰波可用检波器组合进行有效的压制）即：

$$\Delta x \leq \frac{1}{2} \lambda_{F \max}^*$$

$$\lambda_{\text{有 min}}^* \geq \lambda_{F \max}^* \quad \text{所以} \quad \Delta x \leq \frac{1}{4} \lambda_{\text{有 min}}^* \quad (3)$$

由于我们要求

$$\text{则} \quad Dx \leq \frac{1}{8} \lambda_{\text{有 min}}^* \quad (4)$$

根据（1）及（2）式为了计算出所能采用的最在道距 x ，必须计算出信号的最小视波长，（同时也应通过干扰波调查，了解探区的干扰波出现规律和干扰波的最大视波长）如已知探区的地层速度，目的层的深度范围（或 t_0 时）地层的倾角，主要目的层反射波的主频和最大炮检距限定值，可求 $\lambda_{\text{有 min}}^*$

$$\lambda_{\min}^* = \frac{V^*}{f_{\max}} \quad (3)$$

三维情况下，界面反射波的时距方程一般可表示为：

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{(x - 2h \sin \Phi)^2 + (y - 2h \sin \Phi)^2 + 4h^2 \cos^2 \Phi}$$

h —法线深度 Φ —倾角 $\alpha = x$ 轴方位角

$$V^* = \frac{dx}{dt} = V \left[\frac{(x - 2h \sin \Phi \cos \alpha)^2 + (y - 2h \sin \Phi \sin \alpha)^2 + 4h^2 \cos^2 \alpha}{(x - 2h \sin \Phi \cos \alpha)^2 + (y - 2h \sin \Phi \sin \alpha)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{当 } x \text{ 方向为上倾方向时} \quad v^* = \frac{dx}{dt} = \left[\frac{(x - 2h \sin \Phi)^2 + y^2 + 4h^2 \cos^2 \Phi}{(x - 2h \sin \Phi)^2 + y^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{二维 } \rho \text{ 上次} \quad y = 0 \quad \text{测线为纵线时} \quad \text{则} \quad V^* = V \frac{[x^2 + 4h^2 \pm 2hx \sin \Phi]^{\frac{1}{2}}}{x \pm 2h \sin \Phi}$$

$$\text{界面为水平时} \quad V^* = V \sqrt{1 + \frac{4h^2}{x^2}}$$

估算信号的最小视波长 $\lambda_{\text{有 min}}^*$ （公式中正、负号、上倾角方向放炮时取正号，下倾方向放炮时取负号）。从而，可以确定道距 x 及 cop 网格面积（Dx, Dy）由于要求视波长越大越好，因此只设计估算上倾方向放炮时的视波长即可。

3、距的选择

检波点线距的选择原则和道距的选择原则是一样的。如果垂直检波点线方向上的倾角与沿着检波线方向的倾角相近，就应当选择与纵向方向道距相同的线距。但是，有时地层的倾向与下向很清楚，一般选择拾波点线沿倾向方向排列。因此，垂直方向上的倾角很小，所以浅距也就选得大些。一般是取道距的倍数作为线距。在进行三维地震数据采集参数设计时，容易线距的合同选择，把它简单地取为检波点距的倍数是不对的，应当与求 x 一样进行分析后再确定。

4、最大炮检距的选择

最大炮检距的限定值与多种因素有关。并受多种因素制约。因此，应根据探区地质条件和有关地理物理参数综合考虑。

三维地震的炮检距，要用它的纵向（沿测线方向，一般称为 x 方向）和横向（垂直于测线方向，一般称 y 方向）的投影来确定其计算式为：

$$x = \sqrt{x_{\text{纵}}^2 + y_{\text{横}}^2}$$

式中 $x = lx + (Bx - 1)\Delta x$

Lx —纵向偏移（最小炮检距） Bx —纵向排列接收道数

x —纵向接收道距 $y_{\text{横}}$ —非纵距当计算最大炮检距 x 时， $y_{\text{横}}$ 应等于最大排纵距（即横向最大炮检距）

设计三维炮检距时，应使道集（面元）内各道炮检距分布均匀，覆盖参数稳定，最小炮检距（偏移距）的选择使反射波不受强面波干扰，同时考虑所需最大炮检距对偏移的要求等。

最大炮检距的设计应综合考虑以下方面：

保证最浅同的层的反射参数稳定，避免因入射角过大而引起波畸变和寄生折射。

既要保证速度分析精度，又要减少动校正拉伸畸变以及考虑对多次波的压制效果。

保证信号具有足够的效果。

面下分别讨论上述各种因素对最大炮检距的要求

（1）反射参数

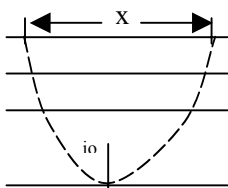
由于地层的吸收作用，地震波的反射振幅随着炮检距的增大减而速小。当入射角接近式等于临界角时，会出现极不稳定的异常值。其变化性情况较复杂。

通常我们要求入射角小于临界角。对水平界面来说，在入射角等于 40° 时，纵波反射参数仍较稳定，几乎不产生转换波。但对于复杂的断陷盆地，由于地层倾角及勘探目的层的深度变化很大，地层到面中，各种岩性（盐膏、砂岩、泥岩、页岩等）交互出现，因而各反射层比值的限定值的变化也很大，加这构造断列复杂以及横向地层岩性——不稳定情况。因此要求入射角的限定值应尽可能小一些，一般认为：这类地区选择的最大入射角的限定值我为 25° （这时的排列长度近似等于主要反射相的层的深度）

假设所选定的最大入射角为 i_0 ，则对应的三个界面的最大炮距限定值由下式给出：

$$x_i = 2 \sum_{i=1}^n H_i \operatorname{tg} \theta_i \quad \text{式中 } H_i \text{——第 } i \text{ 个反射界面的深度，}$$

考虑反射参数稳定的情况，在设计最大炮检距时，应根据探区主要目的埋芷浓度，按照上式来计算 x_{max} 值。



(2) 最大炮检距的限制

目的层的反射界面变化很快，界面曲率变化很时，也要对最大炮检距有所限制。当界面倾斜时，cop 道集的反射点的参数半径是很大的，可达到数百米以倾角为 的倾斜界面来讲座沿倾角方向的弥散距离为：

$$\Delta L = \frac{x^2}{4Vt_o} \sin 2\Phi \quad x - \text{最大炮检距}$$

这时要考虑所采用的最大炮检距时叠加的效果是有利过大的炮距，可能引起叠加效果不佳。

(4) 动校正拉伸

动校正拉伸的作用会使反射波发生畸变并影响叠加剖面的叠加效果，其影响程度随着反射界面的深度（H）与炮检距（x）之比的减小而增大。通常用百分比校正拉伸来衡量动校正引起的波形畸变，其定义：

$$\text{动校正拉伸百分比}(\beta) = \frac{\text{动校正量}}{\text{双程反射时间}} \quad \Delta t = \frac{x^2}{2v^2 t_o}$$

$$\text{则拉伸百分比} \quad \beta = \frac{x^2}{2v^2 t_o^2} = \frac{1}{8} \left(\frac{x}{h} \right)^2$$

当上覆地层为均匀介质且 $x=H$ 时，动校正拉伸率为 $\frac{1}{8}=1.25\%$ ，即动校正后信号频率降低到动校正量后频率的 87.5% 左右。如下覆地层为非均介质，动校正拉伸还要严重，拉拉伸率可达 20%。因此，动校正拉伸影响是不可忽视的。

动校正拉伸引起的频率变化与炮检距的关系

$$f' = f \left(1 - \frac{x^2}{2v^2 t_o^2} \right) \quad f, f' - \text{动校正拉伸前后反射波的频率}$$

利用此式，根据工区实际参数可给制动校正拉伸与炮检距的关曲线，影响设计最大炮检距时的参考。

(5) 速度分析精度

均方根速度和叠加速度均与正常时差有关，只有当正常时差有较大的数值时，才能保证速度与炮检距之比的减速少而增大的。因此为了提高速度分析的精度，应当具有足够大的炮检距。但是，这种速度的精度也随着炮增加而降低。炮检距过大，计算均方根速度的 Dix 分式不成立。因为均方根速度是以零炮检距时间和速度计算的，当使用大炮检距数据求取均方根速度时，会产生误差，炮检距越大，误差越大，而且不同炮检距求取的速度不同，而我们出的速度对于各种炮检距都是统一的速度。所以有在一个最佳炮检距的，即求取速度误差符合精度要求时的最大炮检距。

$$\text{根据反射数时距曲线公式, } t = t_o + \left(1 + \frac{x^2}{2v^2 t_o^2} \right) \text{ 设速度误差 } V$$

则由此引起的的正常时差误差为 t

$$\Delta t = t' - t = \left[1 + \frac{x^2}{2t_o^2(V - \Delta V)^2} \right] - t_o \left[1 + \frac{x^2}{2V^2 t_o^2} \right]$$

$$\text{则 } x = \left[\frac{2t_o^2 \Delta t}{\left(\frac{1}{(v - \Delta v)^2} \right) - \frac{1}{V^2}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

t 为速度分析时检测的最小时差，设 $t = T$ (T 为反射波周期)

$$\text{上式可写成 } x = \left[\frac{2t_o^2}{F(V - \Delta V)^2} - \frac{1}{v^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

根据此式可绘制速度误差与排列长度的关系曲线。用于确定最佳排列长度

(5) 偏移效果的考虑

炮检距对偏移剖面有很大影响，若界面深度为 h ，经偏移后波长峰宽 $(1 + \frac{x^2}{8h^2})$ 倍与

动校正拉伸一致，因此也要求炮检距不要过大。

(6) 多次波与最大炮检距

关于多次波的压制与炮检距的关系。可以通过对叠加特性曲线的分析来进一步了解三维叠加特性曲线形式与三维相同，曲线有三个特点点 x_1 、 x_c 和 x_2 ， x_1 为道效带的边界， x_c 和 x_2 为压制带的边界。 $x_2 - x_c = \Delta x$ 为压制带宽度。 x_c 的数值在小，压制带的宽度

以及压制带内三次极值 P_3 的幅度，显示了多次叠加对多次性等干扰的压制效果。根据

以前的分析：随着偏移距 $\mu = \frac{x}{\Delta x}$ 的增大（随检距的增大）通效带变窄，压制带范围，左移

压制带范围内曲线的第三次极值幅度变小，这些都说明随着偏移距的增加，能更好地压制与一次波速度相近的多次波，并能较高分辨率。所以，要较好地压制多次波，最大炮检距应有足够的长度。

但是过大的炮检距对于压制与一次波速度相差较大的多次波是不利的。因此，随着炮检距的增加，压制带变窄会使多次波落入曲线的二极大区，从而可能得较好的压制。

5、最小炮检距的选择

最小炮检距主要根据勘探最浅层所需要的深度和爆炸产生的干扰波进行选择，在避开干扰波的情况下，最小炮检距应最小。

6、覆盖次数

覆盖次数的高低决定着叠加记录的等比，因此它与压制制规则干扰波和随机噪声有密切关系。同时也与速度分析及计算静校正是有关的。

(1) 覆盖次数与压制随机干扰的关系

若覆盖次数为 n ，则对于压制随机干扰来说，按照统计效应 T 提高 \sqrt{n} 倍。因此现三维地震勘探一样，从统计交应来说，覆盖次数越高越好，但高覆盖次数会受到成本的

限制，而且实际的干扰背后不太大时，过高的覆盖资料是没有意义的。

(2) 覆盖及数与压制规则干扰波的关系

用多次覆盖压制的规则干扰波主要是我次反射波，多次波的压制是靠多次反射波与反射波的时差进行的，一般用剩余时差参数 ζ 表示

$$\zeta = \frac{1}{2t_o} \left(\frac{1}{V_d^2} - \frac{1}{V^2} \right)$$

V_d 是产生多次波层的速度，一般比 V 要小，但在线层假角较大、深层为水平层的条件下产生多次波。 V_d 可能接近 V ，使 ζ 值很小，这时不能达到多次波的目的。一般地说，压制多次反射波需要有较高的覆盖次数和较大的炮检距。

(3) 三维速度分析的要求

从三维速度分析的角度，也是希望覆盖的次数越高越好。同时，在三维情况下还要求方位角分布是均匀的。因此，在设计观测系统纵横向的覆盖次数时也要从速度分析的角度来确定覆盖次数及纵横两上方向覆盖次数的分配。

(4) 解校正是估算的要求

从估算剩余校正是来分析覆盖次数超高，估算静校正呈的结果越倾角。因此，从静校正量的估算出发，也要求三维地震测量的覆盖次数越好。

第三节 三维地震数据体的形成

地震勘探从理论上分析几何地震学和物理地震学（运动学和动力学）两大学科。从生产过程分野外工作 资料处理 资料解释三个阶段。这三个阶段是紧密相关的。前面咱们讲的野外工作方法就是如何获得高质量的原始资料。地震资料数字处理指的是研究如何对地震勘探野外资料利用数字计算机进行处理。得到用于解释的地震剖面，以获得有关的地下构造和地层性质的信息，有效地寻找油气

在计算机中进行处理的内容很多，但处理的目的主要有四个方面：

- 1、地震资料的信噪比，压制在野外接收时没能有效压制的干扰波。
- 2、提高地震记录的分辨能力
- 3、消除由于野外工作方法的限制和地下构造形态复杂而在地震剖面上造成的各种象。
- 4、提取各种有助于解释的地震参数（速度、振幅等）

地震资料数字处理通常追遁相当统一流程。在每个计算机处理中心在细节方面和次序上会稍有差别。

从内容上主要分三个阶段：预处理：对原始数据作适当适当的整理，便于计算机处理。

处理分析：通过试验选择在处理阶段使用的最佳参数。

处理：参数选了后，可进行资料处理最终结果是地震剖面。

三维地震资料处理与二维相似，但各个处理环节必须考虑三维特性和庞大的数据体的操作与管理。

三维地震资料处理大致可发为预处理，常规处理，特殊处理及成果显示四大部分。

一、一维地震资料的预处理

在整个资料处理过程中，约占总处理时间的三之一以上，最资料处理的重要基础。它

关系到最终处理成果的质量和效果。

预处理内容包括：数据解编，资料编辑，炮点检波点位置检查，振幅恢复，反褶积，基准面静校正，辆共中心点道集以及有关处理的方法和参数试验等。

1、数据解编：

野外记录数据是按时分道的，即依次记下每道的第一个采样值，在各道记录完后，再依次记下每道的第二个采样值，以此类推。因此，野外数据的排列可用如下短阵阵

表示。
$$A = \begin{bmatrix} A_1^1 A_2^1 A_3^1 L A_i^1 \\ A_1^2 A_2^2 A_3^2 L A_i^2 \\ M M M \\ A_1^\partial A_2^\partial A_3^\partial L A_i^\partial \end{bmatrix} \quad \text{按时分道}$$

但实际进行处理时这样很费机时，因此必须转换为按道分时，即

$$A' = \begin{bmatrix} A_1^1 A_1^2 A_1^3 L A_1^\partial \\ A_2^1 A_2^2 A_2^3 L A_2^\partial \\ A_i^1 A_i^2 A_i^3 L A_i^\partial \end{bmatrix} \quad \text{按道分时} \quad A' \text{是 } A \text{ 的转置}$$

2、资料编辑

野外数字磁带记录经解编后显示全部炮点记录，然后进行资料编辑，主要内容：

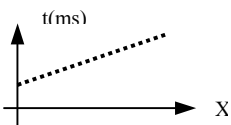
对照仪器班投检查全部炮点记录。落实野外施工期间所观测的有效炮记录是否齐全对于解编过程中所漏失的炮点记录予以补齐，同时去除野外废炮记录。

对异常炮、异常道和不工作道进行剔除。同时纠下反向道，必要时对每一道内的异常段开始予以去除，进行工作时，应尽可能地去除人为干扰，保证有效的信息。

3、炮点、检波点位置检查

(1) 初至波检查

首先根据工作内大量的地震记录，用统计平均方法计算出不同炮检距的初至波时间，

即理论初波  然后，根据地震记录上实际初至波与理论初至波之间的时间差，结合野外实际的观测系统图及仪器班报上所填写的炮点偏移距，结合分析、判断炮点位置正确性，这是在野外采集期间解释组对炮点位置的第一步检查，也是最关键、最基础的检查。

根据最终的测量成果数据（炮点、检波点的坐标与高程）对照检查软盘输出的打印数所，避免软盘上的数据有误。

(3) 观测系统图、坐标位置图、仪器班报三对照检查。

利用野外实际的观测系统图和输出计算机所显示的炮点，检波点坐标位置图以及野外仪器班报上的炮点偏移数据互相对照检查，若三者完全符合，表示炮点位置正确的可能性较大（也可能都错了，若三者不完全符合或者不符合，应进一步分析原因。检查问题所在，这步工作可为下一步检查提供参考。

(4) 通过线性动校正检查炮点位置

对每一炮地震记录进行线性动校正。根据浅层同相轴是否拉直，来判断炮点位置是否

正确,水平地层动校正量计算的近似公式 $\Delta t = \frac{x^2}{2v^2 t_0}$ 根据此式对地震记录进行线性动校正。

如果炮点位置正确(即 X_i 正确)经动校正后的地震记录,其浅层同相轴被接直,哪浅层为水平层,则应与记录上的时间线近于平行。如果炮点偏移距过大,经动校正后的地震记录显示同相轴校正不足。如果炮点偏移距过小,经动校正后的地震记录显示同相轴校正过头。改正错误的方法是:对于位置有错的炮点,根据其可能的错误范围给出不同偏移距进行动校正。直到同相轴被拉直,确定炮点位置正确可靠为上,这时的偏移 x 即为炮点偏移的正确值。但是采用上述方法对于炮点位置错误较小的记录(小于 200cm)较难判断。

(5) 用初至波拉直方法检查炮点位置

这一方法主要是对地震记录的初至波作静校正。把它拉直成一条与计时线平行的直线。根据被拉直的初至波与基准线的时差,判断炮点位置的正确性,该方法能直观定量地显示炮点位置是否错误和应改正的距离。如图示, t_B 为静校正基准线时间图中显示了一条

时间等于 t_B 的直线,它是根据工区范围内炮点位置错误可能达到的最大范围两人为确定的。 t_1 、 t_2 、 t_3 、分别为 1、2、3 道检波器按收到的初至小时间, t_1 、 t_2 、 t_3 分别为 1、2、3 道静校正图中可以看出 $t_1 + t_1 - t_B, t_2 - t_B, t_3 - t_3 = t_B$, 即 $t_1 - t_1 = t_B$, 亦即各道初至波时间加减一个相应的校正量,就能将各道初至波校正拉直到静校正基准线(t_B)上。

如果待检查的炮点位置正确,说明测量成果坐标数据与炮点实际位置一致。则各道炮检距和相应的时间也必然正确。这时用测量坐标数据求取各道相应校正量 t , 并对共炮点各道进行校正,即可把初至波校正拉直到 t_B 时间线上。

如果被检查的炮点位置不准确,这时该炮记录的初至时间,并非该点测量坐标位置的初至时间,而是反映了野外实际炮点位置为初至时间,如采用错误的测量坐标数据的校正(t)是去校正实际炮点的初至波,则校正一的初至时间就不会与 t_B 线重合,而是向前或向后移动,移动的时差大小,反映炮点位置错误的大小,根据这个时差,即可定量估算该炮点正确位置,这种方法的具体实施分步进行。

A: 计算区范围直达波速度 V_t

直达波速度 V_t 在均匀介质中是不随炮检距而变化的常数,但在非均匀介质中 V_t 值是变化的。如采用一个不变的 V_t 值作为校正参数,校正后的初至波将不会是一条直线,而是与实际速度变化有关的曲线。因此在校正前,应根据工区内大量的地震记录,给制炮与初至波时间(t)的关系曲线。用统计分析方法求出不同偏移距的直达波速度 V_t , 并划分速度段,确定出不同偏移距范围所应采用的 V_t 值。

B: 计算不同偏移距的理论初至时间(t_i)

根据所求取的直达波速度 V_z , 在每一个速度相等的段内,根据炮检距范围每增加个道距(X)值,按公式 $t_i = \frac{xi}{V_t}$ 计算出一个相应的 t_i 值,将这些 t_i 值定义为理论初至时间。

C: 选择确定静校正基准线(t_B)

t_B 时间线的选择,应考虑全工区待检查炮点的偏移距错误的范围,如错误范围较大,则 t_B 线时间应选大一些,反之可选小一些。如:书籍工区内 $V_t=2000\text{m/s}$,如待检的炮点错误距离在 400m 以内,它的时间值相当于记录的 0.25 附近,这时的 t_B 线可选在大于 0.25 时间

线上，否则当炮点向检波点方向错偏，且错偏距离在于 400m 时就会因为校正量过大，超出记录范围而无法定量解释。

D：求取静校正量 t_i

根据上述方法确定的及 t_B ，按公式 $t_i - t_B = \pm t_i$ 即可求得校正量 t_i

E：进行初至波拉直校正

校正时，只对静校正的共炮点记录初至波时间 t_i ，按该炮点的偏移距所求得的校正量 t_i ，根据公式 $t_i \pm t = t_B$ 直接进行校正即可。

这种检查炮点、检波点位置的方法，前面步一般，在野外基地由解释组完成，后三步在预处理阶段进行，这种方法主要是对具有较小偏移距错误的炮点记录和一步低信号比记录，在采用线性动校正方法难以判断其炮点位置是否错误的情况下采用的。

4、振幅恢复

振幅恢复的目的是消除与反射参数无的一些因素所引起的反射振幅变化。使恢复后的反射参数有关，振幅恢复包括三方面。

消除二进制增益对反射振幅的影响

设在仪器记录前，由地下传至地震的震波振幅数值时间序列为 $A_t(1,2,3,\dots,n)$ ，记录某个振幅高频值 A_t 时的二进制增益为 2^N ，则记录后的该振幅离散值为 $A_t = A_t \cdot 2^N$ 消除二进制增益

的方法是采用 $\tilde{A}_t = \frac{A_t}{2^N}$ 即对该振幅离散值 \tilde{A} 和 2^N ，可在解编过程中同时完成。

球面扩散和介质吸收的恢复处理

由球面扩散引起的地震波振幅衰减的计算公式为 $Dd = \frac{1}{r} = \frac{1}{Vt}$

处理时，将消除了二进制增益影响的振幅高数值 A_t 和以球面扩散衰减因子的倒数 Vt 介质吸收的恢复用 $A_t = A_{oe}$

$\alpha = \frac{\pi f}{Q}$ 实际上是振幅每秒衰减速率的自然对数。

$\alpha_o = 20\alpha_{\log e} = 8.69 \frac{\pi f}{Q}$ ，现与 f 成正比关系。 f 和 Q 较难确定，分两步来实现，

与数年无关的 P 分 (8.69) 可与球面扩散一起进行， Q 数值可通过一系列给定值进行试验，根据显示记录的深、浅层反射能量基本功的来确定，与频率有关 最终编辑后进行。

归一化处理 (耦合补偿)

处理的目的是消除由于激发和接收等条件的变化所引起的反射波振幅的变化，以提高资料处理的效果。其方法是对某个地震道，在一个较长的时窗内计算其振幅，高频的均方根值，用这个均方根振幅去除液道中的每一个振幅离散值，若相邻炮之间道的振幅均方根值相差比较大，测对于数值偏低的炮，可加一个合适的固定增益，把该炮的振幅值提起来。

5、反褶积

同的主要是压缩地震子波的波形，以投高剖面的分辨率。另外，反出还有子波褶形纹压制多次波等作用。

6、基准面静校正

主要是清除此之外表层低、降建层的速度及厚度变化时对成果的影响，低降出层的速度波厚度资料，一般由野外小折射观测获得，也有用微地震测井式方法获得的。

7、抽井中心检道集

二、三维资料的常规处理

三维水平叠加

三维偏移

1、三维水平叠加

主要是要做好二维速度分析、三维速度分析、三维剩余静校正、三维动校正、三维最终叠加及叠加成果显示等工作，比阶段的处理流程见图 5-16

(1) 二维速度分析

预处理工作完成后，首先要进行二维速度分析，一般在构造复杂的地区，进行 DMO (DMO 时 80 年代中期，使用广泛) 处理时，二维速度分析要进行两次。

第一次速度分析是为 DMO 处理供动校正速度，拾取的速度径二维叠加加 (在某几条测线上进行) 试验认为合适后，在全三维区面上平滑、内插、进行三维动校正 (可显示相应的迭加剖面用于面上的质量控制)，将动校正后的带抽成共偏移距带计算出 DMO 处理所需参数 (如工区内可能出现的最大倾角，最小均方根速度等) 完参参数揭取后，重调原三维道集带进行 DMO 处理。

第二次速度分析的目的是为三维校正提供速度参，采用经 DMO 处理后消除，地层倾角、方位角影响的带作第二次速度分析，选择一些均匀分布的二维测线进行叠加试验，在平面上平滑内插建立三维叠加速度初步模型，进行三维动校正，生成三维初叠剖面。

(2) 三维剩余静校正 (SA+AN)

是资料处理中的一个重要环节，作了基准面校正之后，由于低速带和厚度的横向变化，校正后相对基准面有或正或负的误差，这个误差叫剩余静校正量，对剩余静校正量进行校正叫剩余静校正。在用一般方法处理地震资料时，由于不易得到准确的低速带的速度和厚度的横向变资料，作了基准面校正后，把表条件变化剧烈地区还会产生剩余校正量问题，但由于采多次覆盖野外工作方法，并用数字计算机处理后，故可自动求取剩余静校子。

A：自动求取剩余静校正量的假设条件和一些特点。

自动静校正的具体方法很多，一般是在一定的假定条件下使用，并且利用了目前多次覆盖的一些特点，下面简单讲讲这些假设和特点。

1) 九点假设

一般，剩余静校正方法都是在下述假设条件进行的。

同一炮点在低事带中入射的时间与入射角无并，即可以为在低速带中都是垂直入的。

各炮或接收点由于地形起伏及低速带变化所引起的静校正量时差是随机的。其均值为零，即在一个排列上，有的激发点 (或接收点的时差是正的，有的是负的。平均以后接近于零值。)

以上两点假设在一定条件下是符合实际情况的。例如：在低速带剧烈变化的地区，采用某种方法一定要考虑到实际条件。

2) 几个特点

自动静校正是利用了多次覆盖的资料。由于多覆盖工作方法有以下的特点：

某个记录道的静校正是包括激发点静校正量和接收点静校正量。

设某道的静校正量是 激发和接收点静校正量分别是 S 和 R ，则 $= S + R$ 如果

转射静校正量时是求绝对静校正量，这时要分别求出 s 和 R ，如果仅提取相对静校正量，这时只要求出总的即可。

在一个排列上，一点放炮，24 道（48 道）接收，对此 24 道（48 道），炮点静校正量相同，但 24 个接收点的静校正量不同，设某道总校正量用 $\tau_j (j=1,2,\dots,24)$ 表示，各激发点的接收的静校正量分别用 $s_j (j=1,2,\dots,24)$ 和 $R_j (j=1,2,\dots,24)$ 表示，对于属于同一炮点 S 的各记录道则有：

$$\text{第 } S \text{ 炮第一道校正量} \quad \tau_1 = s + R_1$$

$$\text{第 } S \text{ 炮第二道校正量} \quad \tau_2 = s + R_2$$

$$\text{第 } S \text{ 炮第三道校正量} \quad \tau_3 = s + R_3$$

.....

$$\text{第 } S \text{ 炮第二十四道校正量} \quad \tau_{24} = s + R_{24}$$

以上 24 道当中，都是在同一炮点放炮，炮点静校正量相同，都是 s ，但接收点位置不同，所以接收的静校正量分别 R_1 、 R_2 、 R_3 、..... R_{24}

如果将以上 24 道的总校正量相加再平均即：

$$\frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \tau_j = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \tau_s + \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \tau_{R_j}$$

$$\text{令 } \tau_s \text{ 等于等式右边 } = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \tau_j \text{ 显然等式右边第一项为 } s = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \tau_j \text{ 等式右边第二}$$

项，在低速带变化剧烈地区 $\frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \tau_j$ 是由一些或正或负的项相加平均的结果。根据上面假

设 τ_{R_j} 应趋于 0， $\frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \tau_j \rightarrow 0$ 所以 $\tau_s = s$

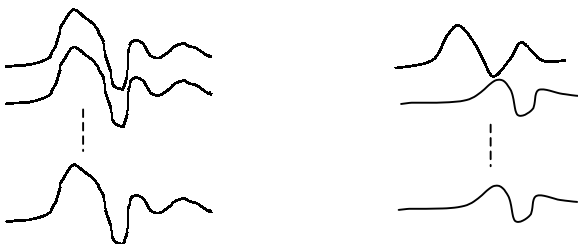
此式表示将属于同一炮的各道的时差或这些道的静校正量相加平均后得到了炮点的静校正量。这样就求出了某炮点 S 的绝对校正量 s ，同理可求得某接收点的静校正量。在各种求取静校正量的方法中，有的方法是求相对静校正量，有的方法是求绝对静校正量。

B：自动统计静校正方法

这类方法具体的做法很多，适合我们只介绍一种

在共深度点道集内求取相对静校正量。

这个方法是在共深度点道集内相对于参考道（或叫元道）用互相法求取对静校正量，并将各道相对参考道进行静校正。以改善共深度上道集的迭加效果。其基本思路是经过动校正以后的共深度点道集，如果没有相对静校正量应该是相位对齐，但是



当有相对静校正量时，动校正以后的道集内各道相位不能对齐，如果能设法把共深度点道集内的各记录相位调整对齐再迭加效果，就会更好。所以这是所提的方法就是要把共深度道集内的各道调齐，具体步骤如下：

1) 参考道的形成

要把共深度点道集的各记录道对齐，必须选择一个参考道，以参考道为标准把各道对齐，这是将共深度点道集内各记录道迭加的结果作为参考道。

$$y(t) \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t)$$

覆盖次数

为什么要用迭加以后的记录遂作为参考道吗？

这是因为这 N 道的地震记录是在 N 个炮点和 N 个接收点上得到的。这 N 道涉及到 $2N$ 个地面位置点，这 $2N$ 个地面位置的静校正量是有正有负的。近似满足假设条件 迭加以后初步消除了一部分静校正量的影响。所以，可以作为参考道。

2) 用互相关方法求取共深度点道集内各道的相对静校正量。

在一个选定的时窗内，使共深度点道集中各道和该共深度点迭加所形成的参考道进行互相关，求出静校正量。

注意：这时求出的静校正量是炮点和接收点相对静校正量相加的结果，不是单个的炮点或接收点的静校正量的绝对值，互相关公式：

$$r_{xy}(t) = \frac{T_2}{2} \sum_{i=T_1}^{T_2} x_i y_{i+\pi} \quad r_{xy}(\tau) \text{ 是互相关函数 } \tau = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M, M \text{ 为最大静校正量。}$$

T_1 、 T_2 表示时窗时起始和终了时间， T_1 - T_2 为时窗长度，用此式编制程序可求取相关函数曲线。相关函数曲线的极大值地应的 τ 值， τ 结果此道的相对静校正呈对共深度点道内各道均用上述互相关方法求取 τ 值作静校正。

(3) 建立三维速度模型

通过三维剩余静校正提高了反射品质，此时应再作一次速度谱，进一步提高速度分析精度，建立速度模型。

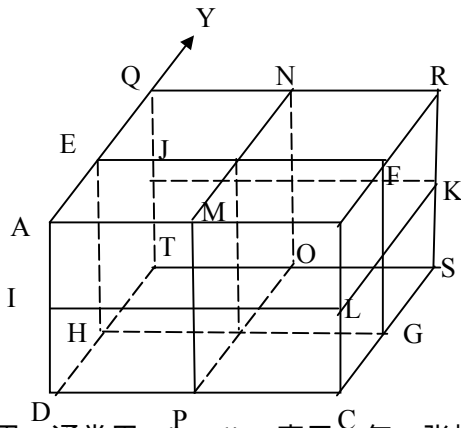
建立三维速度模型的基本步骤：首先是根据初叠剖面选择好所要拾取的反射层，拾取时不一定严格追踪同相轴，而是拾取大致平滑，连续的构造轮廓（遇到断层、回转或无反射地段要圆滑或延伸而过），然后在平面上对拾取的各层进行闭合，建立主管构造模型。第一步是在速度控制的网格点上，根据所拾取的各层 t_0 时间在速度谱上取对应的叠加速度。然后对各层的叠加速度进行平滑、内插、建立三维叠加速度模型，用于最终动校正叠加。

一般情况下，进行速度分析时应注意以下几个问题：

对于覆盖次数，地层倾角变化范围，勘探目的层所处的时间段，勘探地质体的最小范围以及基准面静校正量精度，都要作出心中有数。一般在地层倾角转陡、地质情况复杂和覆盖次数较高的地区，不宜用较多的 COP 道集进行速度谱的计算。若地层较平覆，地质构造较简单，覆盖次数又低，可用较多的 COP 道集进行速度谱计算，以提高谱的质量。

对质量较低的速度谱点，应查看原始记录，看其在勘探目的层范围内有无反射显示，若原始记录与速度谱有矛盾，则应首先检查静校正工作是否有问题。其次是检查参与计算速谱的 COP 点的数量是否够取多了，若速度谱这间的能量团出现时间差异较大，这时可分

三维资料处理后，可产生一个完整的，能反映地质体时空变化的三维数据体，由此数据体可以验出全 P 的水平切片和垂直剖面图，供解释人员使用三维切片图可分为：垂直剖面图和水平切片。



(4) 电影胶片

2、常规构造解释方法

(1) 地震地质层位的确定

(2) 垂直时间剖面对比

的编制。

(3) 水平切片的解释

1) 水平切片同相轴密度 (L) 与地层倾角 () 的关系。

水平切片也是等时切片。水平切片上同相轴的强度反映了反射波的强度。而同相轴的密度与视频率的高低有关, 如图 5.4.5

图中 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 而 $L_1 < L_2 < L_3$ 可见它们之间存在反比关系如图 (b)

$$L = \frac{V_T}{2} \text{ctg} \Phi \quad T: \text{反射波周期} \quad L: \text{水平同相轴密度} \quad \frac{T}{2} \quad \text{反射波形态面积弹} \quad \text{密度}$$

(2) 在断层在水平切片上的反映

A: 同相轴中断, 见图 5.4.7(5-25)

同相轴错开, 但不明显中断, 图 5.4.8 在垂直至场上不易发现。

B: 振幅发生突变, 而在水平切片上同相轴的, 密度发生突变。图 5.4.9(5-27)

C: 同相轴突然拐弯 图 5.4.10 (5-28)

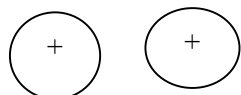
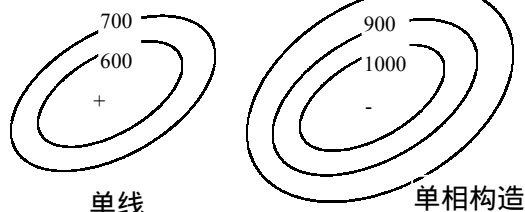
D: 相临面组同相轴走向不致 图 5.4.11 (5-29)

3) 水平切片 断层, 分辨性能 (5-30)

3、等时图的编制

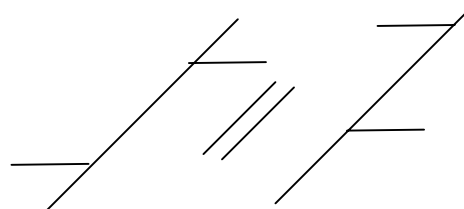
(1) 等时图

(2) 等深度图



双线 同相构造

同一断层, 在上下层构造图上的 不能相交, 层 深层的较浅层的往断层下倾方向偏移。



勾壑断层两侧的等值线应考虑断开前构造形态的联系。

断层上开 等点的等值线的数值断面直立时深浅层构造图上应彼此平行。

当断层倾斜时, 同一断层在各

三、三维地震资料的岩性解释

近几年, 利用地震信息研究地层岩性变化、预测物源方向、划分沉积体系和沉积相带, 寻找砂岩发育区, 评价生储油有利区等取得了丰富的地质成果, 为陷蔽油气藏的勘探, 提供了重要的地质依据。

三维地震资料相对二维资料, 具有高密度采样, 高保真度的特点, 三维反射异常体较二维更可靠。三维显示多种多样……。因此, 三维资料更有利于进行岩性解释。

(一) 振幅、速度层拉平切片在岩性解释中的应用。(层拉平: 就是半已经解释好的某一反射波同相轴拉到任意时间基准面上, 基上、下同相轴部随目的的怪的拉平而作相应移动。)

1、层拉平及其切片的方法

a、在全区选择有意义的目的层, 油层段的砂层组, 特殊岩性段等, 对波峰或波组进行追踪影, 平面闭合, 得到某一反射层的构造图。

b、从上述追踪的好的目的层为标准，将其拉到同一个 t_0 值的水平线上，其上地层及下伏地层也随着该目的的拉平而变化。

c、以 t_0 为标准，向上和向下分别以 4-8 米的采样，对拉平后的数据体作振幅 t_d 并得到反映同一地质层位的振幅异常图。

对经过 $G \log$ 处理实质上是将地震道波形转换为层速度剖面。 $Glog$ 剖面也称为 $Vlog$ 剖面或波阻抗 () 剖面或合成声波剖面等。处理方法是先由反射振幅求得反射参数，再由反射参数用递推法求得各层的相对层速度。再从声波测井曲线提取低频速度模型，最后将两 相加而得到绝对层速度剖面。

2、解释方法

解释流程见图 5.4.27，具体作法如下：

1) 建立砂岩、泥岩、页岩等的 $V-H$ 关系曲线。

利用声波测井曲线，求取不同深度的砂岩、泥岩、页岩的速度值，然后用最小二乘法求出砂岩、泥岩、页岩速度值随深度变化的关系，(图 5.4.28)。该曲线可用于对速度层拉平切片，进行脱压实梯校正和计算形岩百分比含量，也可用来计算不同岩性组合的反射参数曲线。

2) 反射参数曲线的编制及其与振幅的关系。

根据不同岩类的 $V-H$ 曲线，可读出不同深度各类岩层的速度，从而长出各种岩性组合在不同深度的反射参数。作出反射参数与深度关系曲线，如图 5.4.29。为了找出反射参数，再从相应层位的振幅的关系，我们从 $Glog$ 剖面取相邻的高速层和低速层计算出反射参数。再入相应层位的 切片图读出其振幅值，进而找出反射线又与振幅值的统计关系。见表 5.4.2

从图 4.4.29 (a) 可以看出：

a：由砂岩与泥岩或盐岩与泥岩组成的反射界面，只能在 2000~3600 米之间产生强振幅。3600-4600 米能产生中振幅，大于 4600 米产生的振幅原因是泥岩的速度随深度的增加较快，使其与砂岩、盐岩的速度差变小，导致反射振幅变弱。

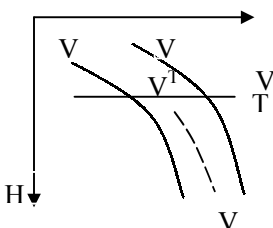
b：由砂岩与盐岩组成的反射界面，埋深 2000-5000 米，都只能产生反射。

c：由砂岩与盐组成的反射界面，埋深 2000-5000 米都只能产生弱振幅。其反射参数小于 0.03。由此可见，盐岩产生强反射是有条件的，与相邻层的岩性和埋深有关，如果邻层是砂岩，则只能产生弱反射，如图 5.4.29(b)上的方 251 井 砂岩过断层与沙三 4 盐接触地震剖面无强反射特征。

d：泥岩与页岩组成的反射界面，在 2000-3200 米反射参数为正，埋深大于 3200 米，反射子波为负，一般只产生弱反射，只有在大于 4500 米才产生中振幅/

4) 层建度的脱后实校正与砂岩百分比的计算方法

同一岩类的层速度，一般埋深 z 深度的增大而增大，这是由于压实作用的影响。为了去掉这种影响所作的校正称脱压实校正。其目的是为了得到真正反映岩性变化的层速度异常，校正方法是根据砂岩 $V-H$ 曲线将同一地质层位而埋深不同的层速度校正到某一基准面 T 上，原理是 V 虚线校正到 V^T 按比例关系得：



$$\frac{VT - V_{泥}^T}{V - V_{泥}} = \frac{V_{砂}^T - V_{泥}^T}{V_{砂} - V_{泥}}$$

$$\text{故 } V^T = V_{\text{泥}}^T + (V - V_{\text{泥}}) \frac{V_{\text{砂}}^T - V_{\text{泥}}^T}{V_{\text{砂}} - V_{\text{泥}}}$$

V ——核前的速度, $V_{\text{泥}}$ ——校正点深度的泥岩速度 $V_{\text{砂}}$ ——校正点深度的砂岩速度
 $V_{\text{泥}}^T$ ——基准面深度的泥岩速度 $V_{\text{砂}}^T$ ——基准面深度的剖岩速度

利用脱压实校正后的层速度, 可计算该层的含砂百分经, 假设把地层为简单的砂、泥岩地层 (不含其它岩类), 那么以下两式是成立的。

$$P_{\text{砂}} + P_{\text{泥}} = 1 \quad (1) \quad \begin{array}{l} P_{\text{砂}} \text{——砂岩的百分含量} \\ P_{\text{泥}} \text{——泥岩的百分含量} \end{array}$$

$$\frac{1}{V^T} = \frac{P_{\text{砂}}}{V_{\text{砂}}^T} + \frac{P_{\text{泥}}}{V_{\text{泥}}^T} \quad (2) \quad \begin{array}{l} V_{\text{砂}}^T \text{——脱压实层速度} \\ V_{\text{泥}}^T \text{——基准 (脱压实校正) 深度的纯砂岩速度} \end{array}$$

从 (1) 式得 $P_{\text{泥}} = 1 - P_{\text{砂}}$ 代入 (2) 式

$$P_{\text{砂}} = \frac{V_{\text{砂}}}{V^T} - \left(\frac{V_{\text{砂}} - V_{\text{泥}}^T}{V_{\text{砂}}^T - V_{\text{泥}}^T} \right)$$

式中 $V_{\text{砂}}^T$ 、 $V_{\text{泥}}^T$ 可从砂岩、泥岩的 $V-H$ 曲线读出, V^T 为已知即可带出 $P_{\text{砂}}$

(3) 振幅切片和速度切片的定性解释

a: 振幅切片的解释

振幅切片反映某一反射界面的振幅异常, 取决于反射参数的大小。而反射参数又取决于上覆高速层 (砂层组) 与下伏低速层 (泥层岩段) 的波阻抗差。因此, 振幅异常反是非曲直了界面上下两个层介质岩性变化的综合影响。但对湖相环境中沉积的砂、沁剖面, 一般泥岩比较稳定, 被作为地层对比的标准层。因此, 振幅的变化主要反映了上覆砂层组的含砂量变化。

对于砂岩、泥岩、盐膏岩交互沉积的层段, 引起了强振幅异常的地质因素。可以是盐岩与泥石岩也可是砂岩与页岩。因此, 必须结合钻井资料标定或综合其它波谱资料, 区域地区资料, 才能得到确定的解释。

此外, 振幅切片对反映沙道砂体 特的功能, 由于 向递与侧岩性突变。因此, 沿向道 曲折的带状振幅异常。再根据带状异常的位置分析有关垂直剖面, 可找到同相轴的分叉或 状反射结构, 进一步落实河道。

b: 速度切片的解释

速度切片有三种, 第一种是界面速度切片, 第二种是高速层切片, 跟波峰以上 16msin 切片, 它反映了砂层组或盐层组的速度变化和分布。

第三种是低速层速度切片, 即波峰以下 8ms 的切片, 它反映了泥岩组的速度变化和分布。

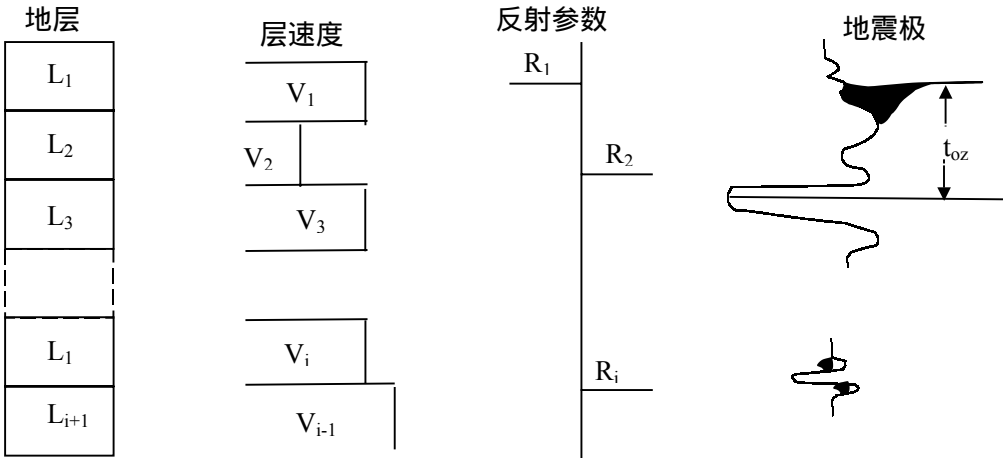
研究砂体时, 主要用第二种速度切片, 研究生油岩和泥岩压力异常, 可用第三种速度切片, 第一种切片的实用价值不大。

速度的变化反映了岩性的变化, 包括岩类、粒度、孔隙度、胶结物成分及流体成分含量的变化等, 对碎屑岩剖面来说, 高速区代表砂岩发育区, 而且向近源方向速度增高, 反映其岩性变粗、低速区一般代表泥岩含量增多。属远源相带的产物, 但要注意, 砂岩含气也会产生低速异常, 孔隙度越大, 低速异常越明显。

5) 砂层组的厚离解释方法

a:厚度解释模型

地震资料通过子波处理和子波转换，实现了由零相位子波与地层反射系次序列褶积形成的地震反射记录，使地震反射波的波峰和波谷与物性界面产生了一致对应性。如下图：地层单元的厚度就是波峰至波谷间的时差。如 L_2 层的厚度为 t_{02}



地震记录上波峰和波谷与物性界面的对应性

b:砂层组厚度图的制作

砂层组厚度，就是高速层的厚度图，如上图中心 L_1, L_3 层（或 V_1, V_3 层） V_1 层与 V_2 层组合（ $V_1 > V_2 > V_3$ ）形成负极性的地震波， V_2 与 V_3 层组合形成正极性的地震波，所以求取砂层厚度的方法是读取同相轴波峰与其中第一个波谷的时差，即时间厚度 t ，再换算成以米为单位的厚度。
$$\Delta H_i = \frac{V_i \Delta t}{2}$$

具体方法有两种：直接读取法和利用解释桌直接作图法。

直接读取法是利用三维垂直剖面直接读取所解释的反射波的波峰和波谷之间的时差，再换算成地层的厚度（视厚度）作出工区某砂厚度分布图。

如果其延续向个切片 14ms 采样，则对振幅异常来说基时间厚度 $t=4(N-1)$ ms，以米为单位的厚度 $H_4=(N-1) \frac{v}{2000}$ ，而对速度异常 18ms 采样，其时间厚度 $t=8(N-1)$ ms，以米为单位的厚度 $H=8(N-1) \frac{v}{2000}$ 。在解释桌上桌上直接作图法是首先对振幅切片或速度切片进行定性解释，识别与砂岩发育体有关的振幅和速度异常，然后利用解释桌，观察振幅速度切片生电影，看研究的振幅速度下异常从哪幅切片开始出现，又到哪幅切片消失。

6) 利用 Glog 剖面研究泥岩压力异常

地层压力是作用于地层中孔隙流体上的压力，正常的地层压力一般等于地表到地层的静水压力。当地层流体压力明显地大于地层静水压力时，称为“异常压力”或称“异常高压”异常高压的存在可抵消地层压力的压实作用。使地层处于欠压实状岩而保持较高的原始孔隙度并产生低速异常，利用 Glog 剖面进行研究，可以发现低速异常预测异常高压区。

(二) 垂向地震剖面的岩性解释

1、利用反射振幅及反射丰度评价储集层

影响反射振幅的地质因素有岩性、孔隙性、流体成分及含量等。其中岩性是主要因素。在有些地区砂岩的层速度无论是否含油气，都大于泥岩的层速度，如图 5.4.28 所示，其速度差为 400-600m/s，反射参数为 $\rho_{65} \sim \rho_{75}$ ，足以产生中、强振幅反射。

对于一磁砂泥岩的剖面，一般泥岩沉积相对稳定，因而反射振幅的变化主要取决于相邻砂层砂量变化。含砂量高，则速度值大，导致反射抗幅强，反之则弱。

2、利用均方根速度计算脱压突层速度并分析物源方向

脱压突层速度的计算方法，是先取均方根速度，再用 Dix 公式

$$V_n = \sqrt{\frac{t_{o,2} V_{R,2}^2 - t_{o,1} V_{R,1}^2}{t_{o,2} - t_{o,1}}} \text{ 计算层速度，再作脱压突校正}$$

对于砂、泥岩地层剖面，脱压突层速度的增大，主要反映相应地层段的砂岩成分、增多、岩性变粗。因此，脱压突层速度增大的方向，一般标志沉积物变粗的方向或近物源方向。

3、油砂组的横向预测

根据录井资料制作全盛地震记录校 井的主力油气层段在地震剖面上，所对应的时间厚度，再精细对比地震剖面，追踪该时间厚度 t 的平面变化，然后转换成以米为单位的厚度变化图。图 5.4.30 车濮地区 186 井合成地震记录与地震剖面的对经，左图是根据文 186 井制作的全盛地震记录，所以示定的 186 井的主力油气层段，相当于 T4 层以下第一个波峰到上覆波谷的时间厚度 t 。图 5.4.31 是经地震剖面精细对比，平面假追踪后所绘制的主力测砂细厚度变化图。油砂 最厚的轴部，呈弯曲形条带展带，具有河道砂体的形态特征，按照该园部署的文 185 井日产气数十万立方米，油数十吨。

4、寻找反射异常体并作岩性解释

地震剖面上的反射异常体，许多是沉积现象引起的，它出现在盆地的物定位置上，具有特定的地震反射外形，内部反射结构和物性参数（ V 、 f —.....）特征识制这些异常体，是寻找地层——岩性圈闭的重要手段。

5、图 5.4.32(b)在濮（特点：是在倾向方向上厚度逐渐增厚，而后地层突然终止，在走向方向时常呈丘状，楔状代表一种快束、不均匀下沉作用，往往出现在同光断层的下降，大陆斜）地区三维 152 主测线，从主测线剖面上发现了两上振幅较弱，但较连续的反射同相轴，由东向西逐渐合并为一个。图 5.4.32(c)是与其相应的 337 联路测线。从联路测线上，亦发现两上反射同相轴，由南往北合并为一个，然后从面上追踪该楔状反射体的时间厚度，并作出民常体的导原图和深度图。

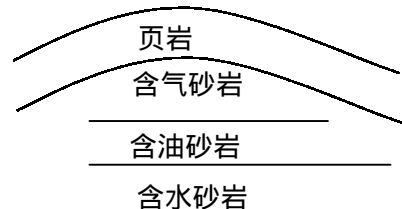
透气井状反射结构（其特点是中 P 厚度在，向二侧 外形呈透合并体一般出现在古河乐，沿岩砂性处，有时有沉积斜坡上可见）

有两上同相轴向两端逐渐靠拢合并

平反射异常体

平点一般认为来自流体，直接检测油气。

亮点、暗点、平点



5、利用合成声波剖面研究砂岩发育区

合成声波剖面是由反射波振幅，反演得来的层速度剖面，层速度的高，低代表不同的岩性。在砂、泥岩剖面中，变速层代表砂层段。低速层代表泥岩段，在泥质岩剖面中，

高速层代表育泥岩、白方质泥岩、灰质泥岩、低速层代表较泥岩或页岩。在盐、育、泥岩剖面中，高速层代表盐岩，低速层代表泥岩或页岩，因此，利用合成声波剖面判断岩性时，必须结合不同层段的岩性结合特征和沉积构造、物化资料综合分析，尽量利用钻井资料标定，然后外推，在没有钻井资料的地区，可用不同岩性的速度与深度的关系曲线，对不同深度速度层的岩性进行判定，为此，必须将合成声波层速度校正为相应深度的声波测井层速度。

6、利用地震与测井资料结合估算孔隙度

$$\text{由 Willy 时间平均方程 } \frac{1}{V_p} = \frac{1-\Phi}{V_{ma}} + \frac{\Phi}{V_f}$$

从此式可以看出，速度的倒数与孔隙度成线性关系。因此，可以用线性方程来描述孔隙度随深度的变化，根据车濮工区钻井资料得出经验方程

$$\Phi = \frac{0.226 \times 10^6}{V_p} - 41.37$$

通过地震反流速度与声波速度的对比，(图 5.4.33)，可找出两者间存在误差，进而对反流速度作差值校正，即可代入上式计算，称为地震孔隙度。

四、人机联作地质资料解释

人机联作解释就是解释员在计算机的帮助下，进行的地区、地球物理资料的综合解释工作，而辅助解释工作的计算机系统就被称为人机联作地震系统。

(一) 人机联作地震资料解释系统种类

1、根据计算机主机配备工作站的数量，分为单工作站系统和多工作站系统。

(1) 单工作站系统

一个主机带一套工作站，此类主机多采用微型机或超微型机，其特点是系统中，灵活，响应速度快，对场地的条件要求不高，硬件系统维护简单但主内存较小外部磁盘容量小。

机型有 GEOQUEST LANDMARK CGG 的 INTERPRETER 及 GSI 的 VAXMICROSIDIS 两方地球物理公司的 CRYSTAC 等。

(2) 多工作站系统

一个主机带 2 - 3 套甚至更多的工作站，特点是：主机大（多为小型计算机）内存容量大，外部可带多个硬盘组，可容纳多个三维区块的磁盘可同时进行几个三维和二维工区的资料解释，在地震解释工作量大并场地条件多采用多工作站系统较优越，缺点是响应速度受到限制，同时场地条件要求高，硬件维护，主机系统操作及系统维护复杂，需要人管理。

2、根据解释系统与计算中心有无直接联系可分为脱机型和联机型两种。

(1) 脱机型解释系统

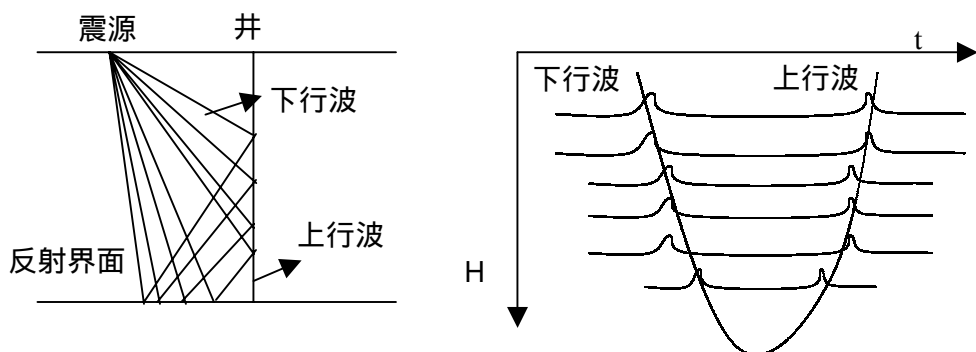
这种系统与计算中心资料处理系统无直接联系，因此它们之间互不影响，对解释和处理都有利，目前人机联作解释系统趋向于脱机类型发展，如 GEOQUEST LANDMARK 等型均为脱机型。

第五节 垂直剖面法

一、第一节 VSP 野外资料采集

(一) 垂直剖面法的基本概念

在地表附近一些点激发地震波，沿井孔不同深度布置检波器观测，这种方法称为垂直剖面法 (vertical seismic profiling) 突部就是一种井中观测方法。



它是地震测井的一个发展，地震测井 100-200 米。

特点 (1) 每次接收一个检波器的记录，之后依次向上提检波器，得到多次记录

(2) 上行波，下行波时距曲线对称。

优点：(1) 通过观测波场在垂直方向的分布来研究地质剖面垂向变化，波的运动学，动力学特征更明显，更直接。

(2) 检波器离目的层很近，可记录到较准确的地震子波波形，便于反褶积。

(3) 避开地表，降低速带变化的干扰，随机噪声小，易于准确识别各种波

(4) 可以接收上行波，下行波，转换波向，地面接收只能利用上行波。

(5) 准确地观测质点偏振的方向，这一参数可用来研究波的性质和地层岩性的性质。

发展趋势：地表地震记录联合反 X 地下参数，识别岩性，研究波的性质，井间层等方向有很大的作用。

(二) V S P 震源

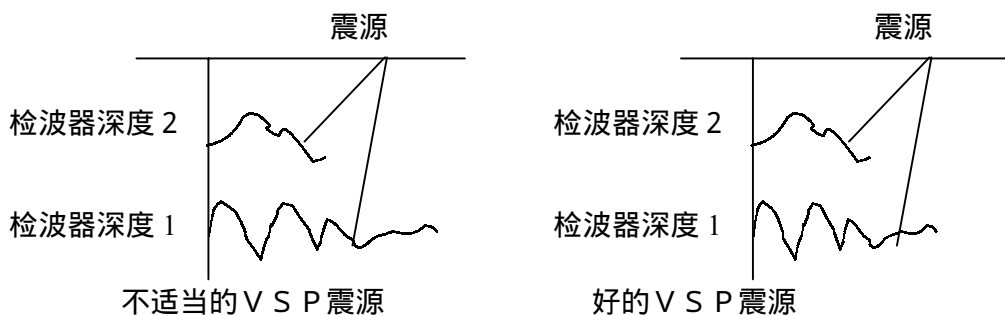
1、选择震源的一般原则

(1) 其震源最好与井旁地震剖面震源波形一致。

V S P 资料的应用之一就是帮助地面地震资料的解释，当两者即用震源一致时，同样的震源子波表现出的反射特征也一样，这就容易实现地表资料和 V S P 资料的统一解释，不一致时，可通过子波互等化反褶积等使两种子波等价

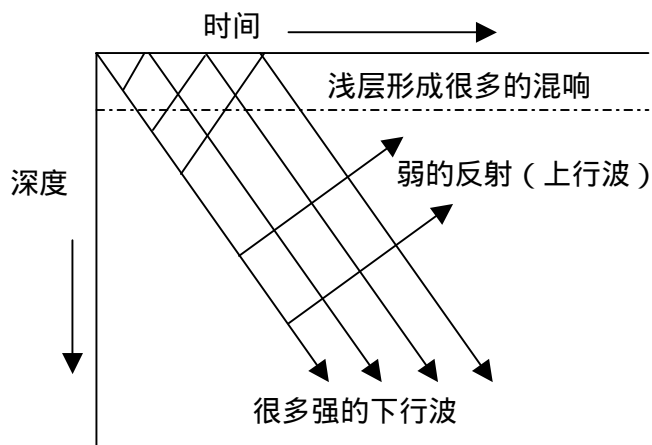
(2) 各次激发的震源子波应具有高度的一致性和重复性。

目前除苏联使用多道井下仪以外，其它都使用每次激发井下检波器只在一个深度上记录，因此为了以较小的深度间隔在整个井式一段井上进行观测，就需要在地表同一位置激发数十到数百次，这些多次激发，先后在各个深度观测，最后拼成的 V S P 地震记录，只有当震源子波互相一致时才便于对比。



(3) 输出强度适中

在记录地表地震资料时，很多地球物理学家已经发现震源输出越强越好的观点并不正确，VSP中更是这样，如图三，表明，垂直地震剖面的下行波通常比上行波强得多，但VSP资料的大部分应用都涉及到对X



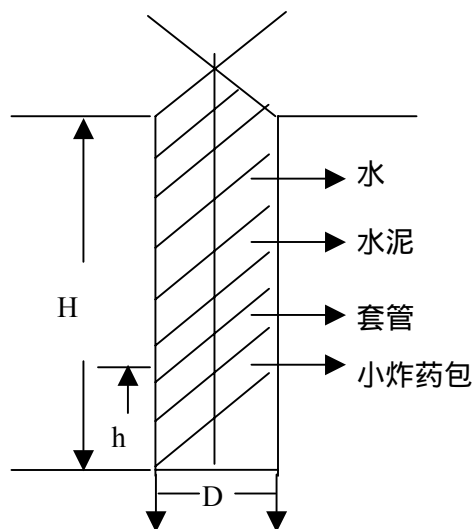
上行波的分析解释，另外，随着震源强度增加，线部交混器响也明显增强，因而引起下行波的数目增多和振幅增强，上行波被这些下行波淹没所带来坏处或许比上行波本身能量增强的影响更大，因此应选强度适中的震源为宜。

(4) 激发频谱尺可能宽，以便提高分辨率

2、震源类型

(1) 炸药震源

为了改善震源的重复性，苏联方法主要是仔细地选择激发岩性和合适的炸药量，西方正考虑井源
井深较大12 - 15米，钻到风化层之下，药包高度h得3米，井径D足够大（直径大约1米）炮井内下套X和浇灌水泥套X直径一般为30英寸（1英寸=25.4毫米）水泥要返到地面，套管中要灌满水，炸药量尽可能小一般0.5-1公斤，也可通过试验测之



(2) 人工可控震源(vibrator)

通过相关处理求取反射信息，特点：重复性好，缺点，笨重，体积大。

(3) 气枪震源

主要用于海上，将压缩空气压入气枪，然后突然释放，形成强的冲击波

如图 1.8 (P11) 优点：安全，可靠，成本低，效率高，子波简单

缺点：装备复杂，气泡干扰，能量较小，也可用于陆上 P15 图 1.17

(4) 电火花震源

激发过程 (1) 由发电机给电容器组充电，在电容器两板之间形成高压，(2) 打开阀门高压电通过电缆送到置于井内的电极，(3) 两极两端通过水溶液放电，产生高温高压脉冲并转换为弹性波，电极也可以不放在线井中而放于地面倒扣的锅内。

优点：操作简便，效率高，重复性较好，频谱较高。

缺点：能量较弱。

(5) 横波 V S P 震源

横波震源横波地震勘探的关键设备，在 V S P 中有下列几种横波激发方式

(1) 锤击：将一块带齿的垫板牢牢地压在地面上，用一个摆式重锤尽可能地沿水平方向撞击垫板，产生水平振动，形成横波。

(2) 横波可控震源或纵，横波联合的可控震源，工作时也是将用于产生横波的带齿的垫板压紧地面，而后像纵波可控震源一样，控制垫板沿水平方向连续振动。

(3) 美国陆军加农炮改装的震源，这种加农炮不发射，炮弹而发射水，利用炮的后座力产生横波，通过控制每次发射的水量和角度等号数

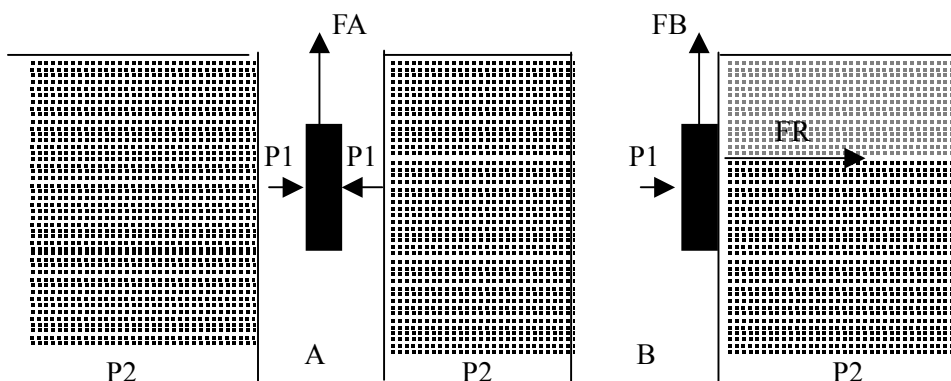
(4) 电火花，连续振动产生横波等。

二、V S P 观测方法

在标准的 V S P 测量中，检波器是放到井中不同深度，并推靠到井壁上，接收传到井壁的地震波的，因此，井的状况对于 V S P 收到能否顺利进行，记录质量的好坏，资料是否便于解释都起着决定性的作用。

1、可在裸眼井，和有套管井中观测。

在裸眼井中观测时，特别要防止遇阻情况，无论是检波器遇阻或是电缆遇阻，往往都是由所谓差压波附现象所引起的如图 1.24 示。



为了保护井中液柱的压力 P_1 应大于地层孔隙中流体的压力 P_2 ，当仪器位于井中心不靠井壁时，仪器四周的压力都是 P_1 ，因此提升仪器的力 F_A 是仪器重量和仪器排开的液体重量二者之差，当仪器不位于中心而靠到井壁上时，将有一个横向力 F_R

$F_R = (P_1 - P_2)A$ (A 是仪器和地层的接触面积) 将仪器压向井壁，因而提升仪器力 F_B 还需克服 F_R 引起的滑动摩擦力，这种现象叫差压吸附现象。

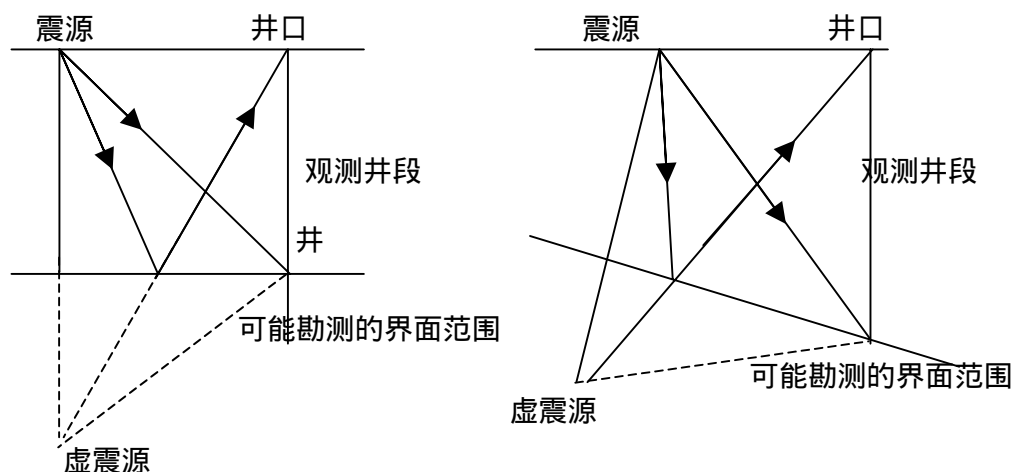
一般先将检波器下到最深处（观测时间小于 15 分钟，有的公司规定小于 5 分钟）

2、观测系统

（1）零偏移距垂直地震剖面

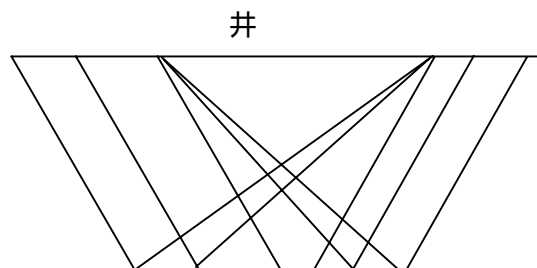
在井口附近放炮水平距 $d=0$ 第每次激发只在一个深度点上记录一道，处理时，再拼成多道。

（2）非零偏移距 V S P 离开一段距离观测。



零偏不能勘探偏离井以外的界面和构造变化，而非零偏可勘探从观测井-震源一半距离内的界面范围

（2）移动震源或多偏移距 V S P

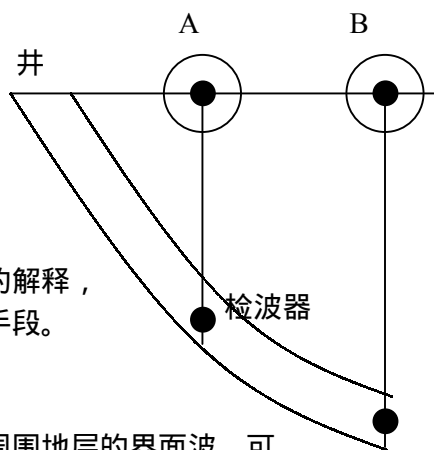


震源沿过井测线逐渐移动的观测井位于剖面中心，优点：便于利用透射波进行勘探，更好实现共深度点迭加，缺点：施工麻烦，效率低，处理解释复杂。

（4）斜井 V S P 观测

震源在地面的位置，随井下检波器现在井下位置的变化而变化，以保证从震源直接传到检波点的射线路线尽可能垂直的。

优点：可增加井附近界面的勘探范围，对于井周围或井之间复杂构造的细节变化可作出精度很高的解释，可直接用于地层及岩性解释，油田开发评价的一种手段。



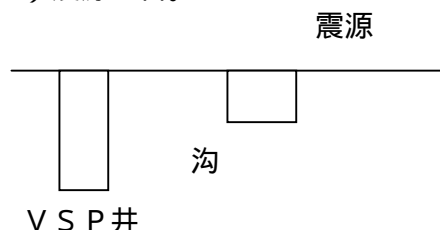
四、V S P 观测中的一些干扰波

1、井筒波：沿井住流体传播的波，是井柱流体和周围地层的界面波，可能内套管振动，地面瑞需波等引起

特点：强度高，振情几乎不衰减，视速度低，质点振动轨迹为椭圆

如图 P38 图 1.50 压制方法：

- (1) 降低液面高度，(2) 加大偏移距，(3) 在震源和井之间挖一条沟或设置障碍物，
- (4) 震源组合。



2、井下仪器与地层来易合不良引起的噪声

仪器推靠不好，沿井壁蠕动引起的噪声，P 42 图 1.57,示

3、电缆波，因电缆振动引起噪声，有时形成初至波。如图 P43 图 1.58 示，消除，将电缆放松。

4、套管波，由于套管和地层胶结不良而引起的，或沿钢管传播的波很难消除。

5、其它噪声：随机振动，交流电干扰。

三、V S P 的常规处理

(一) 同深度迭加

对井下同一观测深度，重复激发 5-30 次，然后迭加起来形成一道

$$f(Z_i, t) = \sum_{j=1}^J f_j(Z_i, t)$$

目的，(1) 增强信号能量 (2) 压制随机干扰，大约提高 \sqrt{J} 倍。

影响迭加效果的因素 (1) 每道子波是否相同，(2) 起始时间是否对齐

通常对记录先编辑，剔除干扰大，子波变化大的道

(二) 初至拾取，确定 V S P 每一深度的记录道上初至下行波的起始时间。

目的：

- (1) 建立可靠的时——深关系。
- (2) 精确计算层速度。
- (3) 对声波测井曲线进行标定。
- (4) 为排齐，提取子波处理提供基础。

通常的方法：

- (1) 取一道较好的记录，与各道做互相关，然后拾取相关峰值。
- (2) 在拾取之前进行带通滤波。

产生误差的原因：

- (1) 爆炸时刻记录的延时误差，一般在 1ms 之内，能常将“检测检波器”不简单地置于地表，而置于震源下几米处以此为参考点。
- (2) 相临界面反射的干涉结果，通常只用下行波（与上行波分离）拾取初基。
- (三) 静态时移和排齐

排齐：通过静态时移将记录上的同相轴按时间 t_0 对齐

一类是上行波排齐，另一类是下行波排齐

对于水平界面情况下的零偏移距 V S P 观测，排齐主要通过静态时移实现，设震源到检波器的上行波和下行波射线路径如图 2.7 和图 2.8 所示，为了，图中震源与井口的距离被拉开，图 2.7 说明的是上行一次反射波和多次波，高 TA, TB, TG 分别是震源到反射层 A，反射层 B 和检波点 G 的单程时间（图中射线画的是倾斜的，实际上假设它们是垂直的）则很容易看出（例如引入虚震源观察）到达检波器 G 的一次反射波 A，反射波 B 和多次波 M 的传播时间分别是：

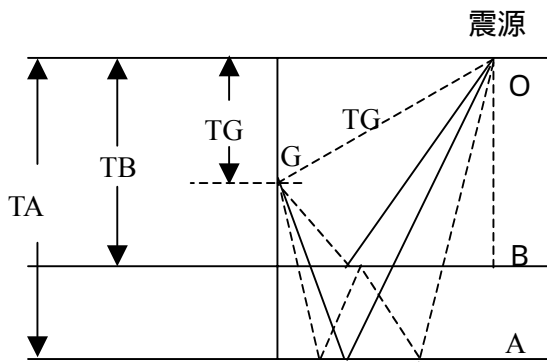
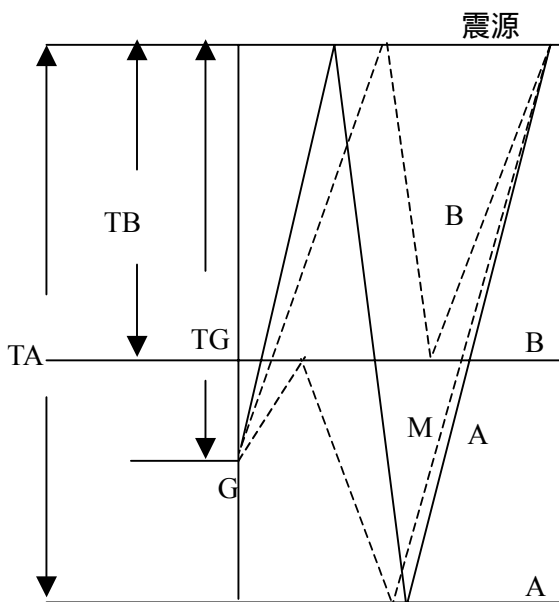


图 2.7

图 2.8 说明的是下行多次波和层间多次波，很容易看出，到达检波器 G 的下行多次波波 A，下行多次波 B 和层间多次波 M 的传播时间分别是：



$$\begin{aligned} t_a &= TA + (TA - TG) = 2TA - TG \\ t_b &= TB + (TB - TG) = 2TB - TG \\ FM &= TA + 3(TA - TB) + (TB - TG) \\ &= 2TA + 2(TA - TB) - TG \end{aligned}$$

这些表达式的共同形式是：

上行波到达检波器时间 = 上行波从震源经过单次或多次波反射到达地震的双程时间从地表到检波器的单程时间。

$$\begin{aligned} tA' &= 2TA + TG \\ tB' &= 2TB + TG \\ tM' &= TA + (TA - TB) + (TG - TB) = 2(TA - TB) + TG \end{aligned}$$

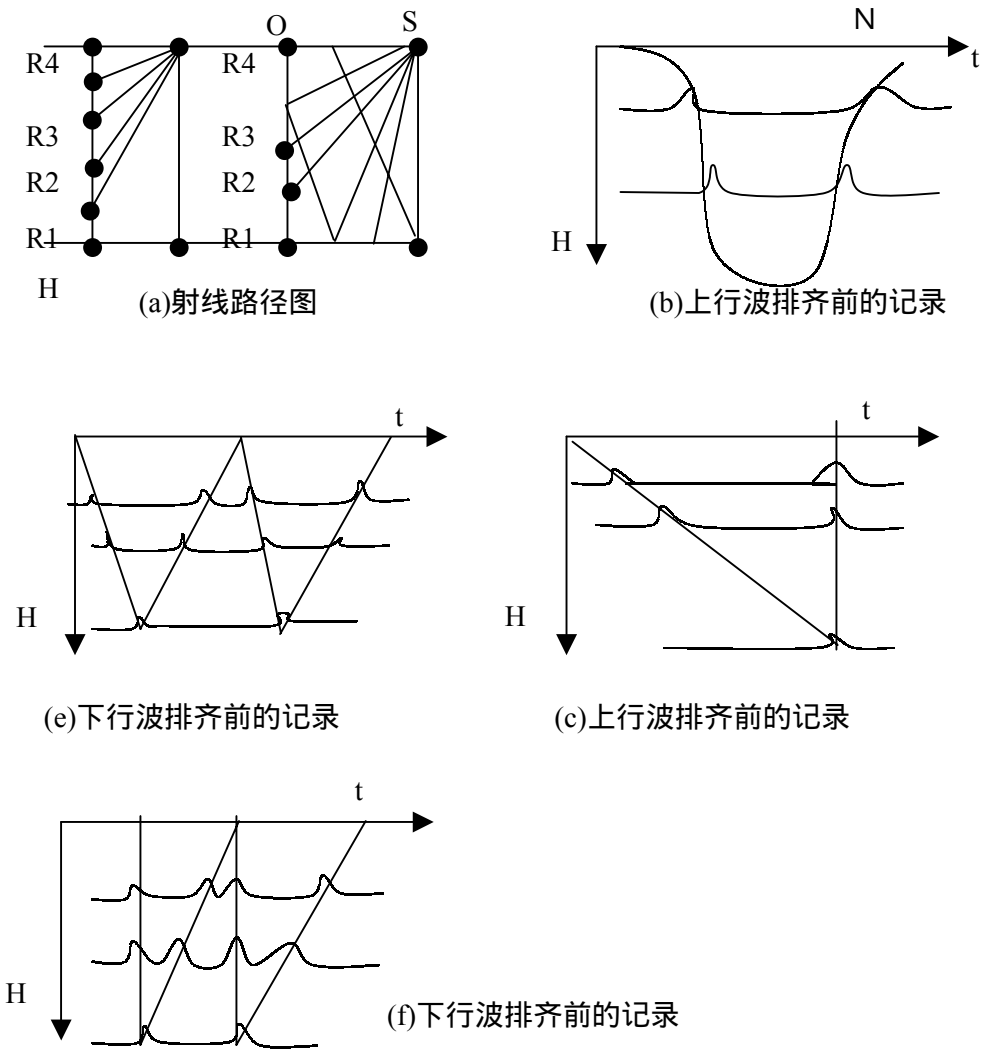
上述表达式也有着共同的形式

下行波到达检波器的时间性 = 下行波从向上反射的界面到向下反射的界面可以是地表，也可以是某一界面) 的双程时间 + 从地表到检波的单程时间。

根据这两组公式

- (1) 如果静态时移，每道加下行波初至时间 TG ，则上行波将扫其从地表到界间的双程时间排齐。
- (2) 如果静态时移，每道减下行波初至时间 TG ，则下行多次波将按其向上和向下反射的两界面之间的双程时间排齐，下行直达波将按零时间排齐。

垂直地震剖面记录经排齐后的显示方式说明见图 2.9



影响排齐效果的因素包括：

(1) 初至拾取的精度 ,(2) 实际地层与假设是水平界面零偏移比观测的模型的符合程度 (对于非水平界面或者对于非零偏移距观测 , 需要通过动校正 , 而不是静态时移才能将同相轴排齐) (3) 非地表震原 (例如 : 线抗式浅井中激发 , 深度变化引起的误差是否已作了可靠的炮点静校正) (4) 爆炸因爆炸延迟和其它随机因素引起的误差是否已作了额外的补偿。

(四) 震源子波整形

V S P 大多数的处理和解释都以每个深度道有相同震源子波波形的假设为基础 , 例如 , 多道速度滤波处理模型中 , 假设前提是相邻记录道的有效波形相同 , 只是到达时间不同 , 如果震源波形变化 , 使条件不成立 , 则速度滤波后的资料质量将会变坏 , 再如 , 解释时 , 人们希望根据波形变化推断岩性变化 , 这也假定波形变化不反映它、震源子波波形变化为前提 , 但是 , V S P 实际观测时 , 震源子波波形很少一改。

解决这一问题的办法是在震源附近布置一震监控检波器 , 并利用监控检波器记录的波

形，对每道记录作震源子波整形滤波（也称震源子波整形反褶积），处理XX主要分两步：
 （1）选择某一监控检波器记录的震源子波为期望输出（或标准子波），其它各深度道监控检波器记录的各个震源子波作为输入（原始子波，每次只输入一道）用最小平方方法求出每一道子波整形的滤波算子（反褶积算子）

（2）用求出的滤波算子对相应深度井下检波器的原始记录作反褶积，求得该深度道经过子波整形记录。

五、频谱分析和带道滤波

带道滤波的目的是压制随机噪声背景和某些相干噪声。

为了根据有用信号，相干噪声和随机噪声的频率选择滤波的通常，先要进行频谱分析如果相干噪声的频带全部或部分在有用信号的频带之外，滤波的效果比较明显，图 2.15 是带X滤波压制井筒波噪声的一个实例，如果相干噪声的频带在有效信号频带之内，设计只让信号频带通过的滤波器，信号比也会有部分改善。

带道滤波的实现方法和注意事项与地面地震剖面的资料处理类似

1、振幅处理

级前扩散补偿 ($AVt = \frac{A_0}{r} e^{-\alpha vt}$)

补偿后 $\overline{A_0} = A(t)re^{\alpha vt} = A(t)vt \bullet e^{\alpha vt}$

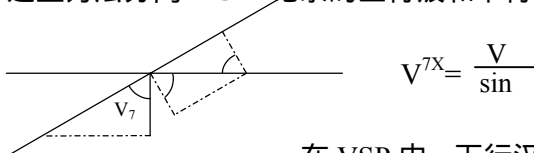
（七）分离上行波和下行波

V S P 记录中既包含上行波，也包含下行波通常要对上下行波进行分离，以便得到上行波便于和地面地震资料对比进行综合解释，分离的主要方法

（1）垂直迭加（2）多道速度滤波（3）F——K 滤波（4）T——P 域滤波

（5）中值滤波（6）最佳拟合滤波（7）最小乘法滤波

这些方法分离 V S P 记录的上行波和下行主要依据是二者的视速度不同。



在 VSP 中，下行波随着记录速度增加，旅行时增加永久速度取正号
 上行波随着记录速度增加，旅行时减小永久速度取负号

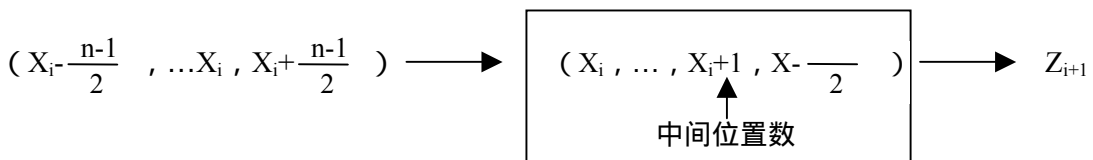
(5)中值滤波

A:原理，设一组数据序列为 $X_i, i=1, 2, \dots, m$, 如果中值滤波的时窗长度(称跨度)为几，则第 i 个点的中值滤波过程是：

（1）取的第 i 点为中心的几个样值作为输入， n 为参数。

（2）对这几个数据按数值大小重新排序。

（3）取重排后的中心位置的样值为该点的滤波输出。



从 X_i 为中心的个数
 (注意：下标 j 是按序的，
 Z 值的大小是随输入标号变化的)

(将输入的个数按值的大小
 重排注意：下标 j 本身不按序，
 Z 值按从小到大的顺序)

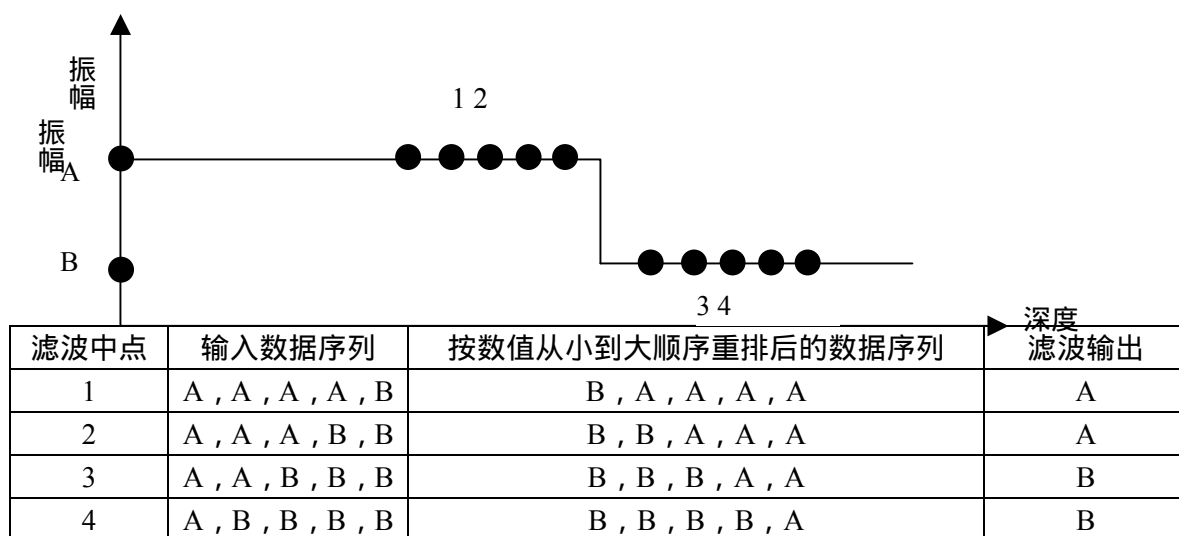
重排原数据序列中
 中间位置的数

中值滤波数学过程示意说明

滤波过程说明如图 2.35，P93

B:中值滤波特点：

- (1) 非线性滤波，不能写成 $y(t)=x(t)*a(f)$ 形式
 - (2) 可以绝对地消除尖峰干扰，因为按数值增加的顺序重新排列数据后，中间位置的数值绝对不可能是尖峰值，峰值已被移到重排时窗的末端。
 - (3) 中值滤波可使阶梯参数通过，但不移动位置 P95，图 2.37。
- 阶梯参数的值在采样点 2 和 3 之间从 A 降到 B，中值滤波的输出也是一个阶梯参数，其值在采样点 2 和 3 之间也由 A 降到 B。



C、中值滤波在分离 VSP 上，下行波中的应用。

- (1) 将 VSP 资料进行静态时称，使下行波沿垂直方向排齐。P97 图 2.40。
 - (2) 沿垂直方向作用值滤波，这时垂直排齐的下行波得到加强，倾斜穿过的上行波大大减弱。
 - (3) 将中值滤波结果按原来的时称时间“反向静态时称”得到没有上行波的原始记录。
 - (4) 从原始记录中减去 (3) 得到的记录，即消去了下行波。
- (八) 反褶积

也是 VSP 资料处理序列中的一项重要处理，内容主要包括：

- (1) 利用下行波，计算反褶积算子，对下行波作反褶积。
- (2) 利用下行波，提取的算子，对上行波作反褶积。
- (3) 利用 VSP 提取的反褶积算子，对地记录作反褶积。

1、下行波反褶积。

常规反褶积的一个主要困难是地震子波未知，因此，只好用统计方法对子波作估计，但估计的精度由于假设条件和存在噪声原因，往往效果不理想，VSP 方法的一个重要优点是利用 VSP 下行波可以观测到比较理想的子波，因为：

(1) 检波器安放在相对“安静”的井内，受噪声影响比较小。

(2) 记录到的下行波场信号能量强，通常比地高记录到的波的上行波能量强 10~100 倍，因此对子波估计精确。

(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 下行波提取子波的主要困难：

(1) 表层地震能量交混 XXXX。

2、下行波提取的算子对上行波反褶积。

P102 图 2, 4, 6, 示意地说明下行波和上行波的一次波和多次波之间的时间关系，可以看出它们二者的一次波和多次波之间的时间关系是相同的，下行直达波 DA 手向多次波 M1 和 M2 的延迟时间分别是 T1 和 T2，上行反射波 P 后向的多次波 M1' 和 M2' 延迟时间是 T1' 和 T2'，而 T1'=T1, T2'=T2，因此如果下行波到预测反褶积。能消除下行波后面的多次波，那么同样的算子也能消除上行波后面的多次波。

如图 P103, 图 2.47

3、VSP 提取二算子对地面地震记录反褶积

步骤：

(1) 计算 VSP 下行波的自相关。

(2) 通过预测反褶积，尽可能地漏孔每水层混响的影响。

(3) 对剩余的资料再作自相关。

(4) 计算一个可消除其它多次波的反褶积算子。

(5) 利用比算子对地面地震记录作反褶积，消除海水混响以外的多次波。

(6) 再作 XX 反褶积，消除海水层混响。 P106, 图 2.50

(九) 垂直求和找迭加

为了进一步增强上行波，震域下行波，提高信噪比，并为了 VSP 资料更好地与井旁地面地震剖面对比，常进行垂直求和处理，有几种稍有不同的作法。

1、局部垂直迭加（混波）

类似于地面地震资料处理中的混波，首先将经过上行和下行波场分离及反褶积处理的资料排齐然后按

$$\overline{S_J(t)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{i+k(t)} \cdot f_{i(t)} \text{ 进行迭加}$$

SJ(t) 为 J 个深度点的输出，Si(t) - 为 i 个深度点的信号输入，fi(t)-滤波出权 N-滤波（混响）k=J-(n+1)/2

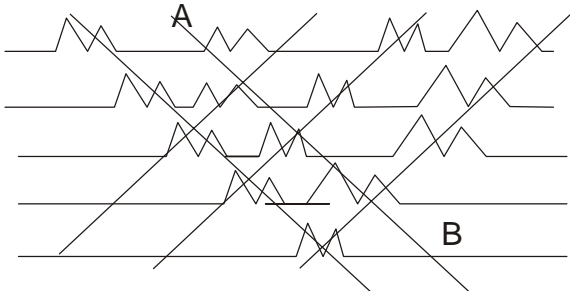
2、垂直求和（又称上迭加）

先排齐上行波，再将所有道的数据按导时间线相加在一起，得到一个输出道，输出资料为单道记录，但是为了便于观察，将波原道输出垂直显示若干次，形式上变为多道。

应强调的是在排齐上行一次波的同时，上行多次波也被排齐，为了压制多次波在垂直求和之前，应先作反褶积，消去一次反射波后面的尾巴。

3、限制的垂直求和（又称走廊迭加和切除迭加）

VSP 记录的特点是初至及一次反射波的开始区域场紧靠初至附近，而多次波则在靠上的区域，即图中 AB 线的右上方，为了消除多次波，将 AB 线右上方的区域“切除”而将左下方区域的数据进行上行波排齐处理 F-K 域波消除下行波，或中值波波法得到静态时移后的只含上行波的 VSP 记录之后对这些道”垂直迭加再成一道，这些道中只含上行一次波可以与地面地。



为了形象“地震记录”将垂直迭加后——道多次显示形成 VSP 走廊迭加。

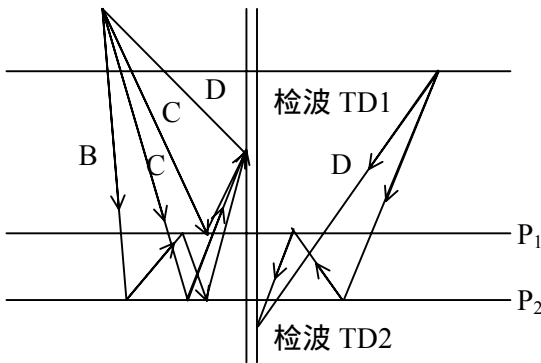
也称 VSPLog,P109 页，图 253.254

三、第三节 VSP 资料的解释和应用

各类多次波干扰和分辨率低是影响地面地震资料记录面貌的两个主要原因但是借助于制裁量良好的 VSP 资料可靠地识别多次波,帮助区分地面地震记录上的一次反射,还能利用 VSP 资料设计出更合理的反褶积算子,以提高地面地震的分辨率,因此利用 VSP 资料改善地面地震资料的解释是 VSP 资料的一项基本和主要的应用。

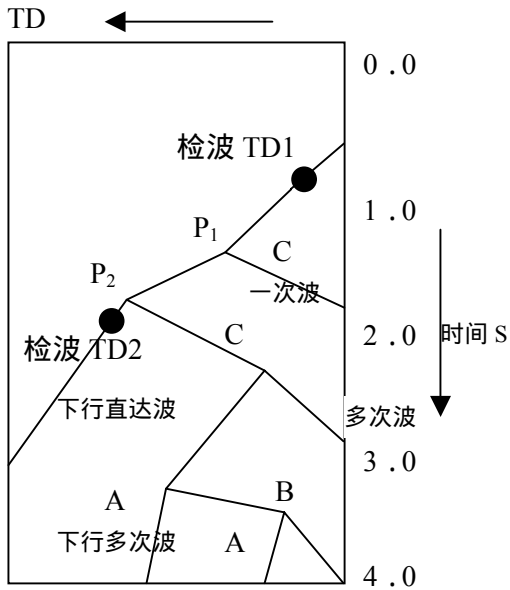
1、识别地面地震记录上的多次波

利用 VSP 资料可以帮助识别地面地震记录上的多次波，并指明多次波的夹层和 XX 过程。



图中 TD 表示井的最大深度,D 标记下行直达波 C 表示界面的 P1 和 P2 产生的上行一次反射波。B 表示上行多次波。A 表示下行多次波，分析右图可看出，多次波用相轴的主要特征是：

(1) 多次波同相轴与相应的一次波同相轴大致平行（零偏移排水平界面时完全平行）但多次波的旅行时大于相应的一次波的旅行时。



(2) 上行一次反射波 C 与下行直达波口的同相轴相交, 并以 D 为其终点, 但多次波 B 的同相轴与下行波 D 不能相交, 即不能延伸到 D, 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示形成多次波的最深一次反射的反身界面, 由此判断多次波的夹层。

2、提高地震记录的分辨力

高分辨地震勘探发展的一个保题, 反褶积是资料处理进程中提高分辨率的一项关键技术, 我们知道利用 VSP 下行波有可能观测到比较单纯的地震子波, 提取出比较理想的反褶积算子, 利用这种反褶积算子可以对 VSP 下行波作反褶积, 消除线层交混回响等跟在下行直达波后面的尾巴, 改善下行波记录的面貌, 对 VSP 上行波作反褶积, 清除不同周期的多次波, 压缩子波波形, 改善 VSP 上行波记录的面貌, 提高 VSP 上行波的分辨率, 对地面地震记录作反褶积, 衰减地面地震记录中的多次波, 提高地面地震记录的垂向分辨率。

利用 VSP 提取的反褶积算子对地面地震记录用反褶积比用地面地震资料本身提取的反褶积算子, 作反褶积, 其效果也有明显改善, 如图 4, 6 左边是声波井曲线和经反褶积后的 VSP 上行波场, 中间是利用通常的反褶积算子作常规反褶积处理的井旁地面地震资料, 右边是利用 VSP 提取的反褶积算子对地面地震资料作反褶积后的井旁地面地震剖面可以看出, VSP 资料与声波测井曲线对比良好, 测井曲线上指示的储集层中的高孔隙度砂层。