

三维液体地震模型实验方法的研究

张建功 赵鸿儒

摘 要

利用水、汽油和甘油等常见材料制作三维液体模型,可供地震勘探方法试验。模型Ⅰ是一个三维透镜体,所得到的光点反射记录,证实了“亮点”具有振幅增强、极性反转等特征。模型Ⅱ是一个礁块构造,在几条测线上观测到的记录,清楚地显示了模型的轮廓。模型Ⅲ是一个简单三维模型,应用十字观测法进行观测的数据,反演了模型的宽度和厚度。上述实验表明,方法是可行的,效果是良好的。

ABSTRACT

The 3D liquid model made up of common materials, such as water, gasoline, glycerine etc., may be used for experiments of seismic exploration. Model I is a 3D lens. The photo-records of reflections obtained show that the "bright spot" has the character of strong amplitude and reverse polarity. Model II is a reef. The records observed from several seismic lines clearly show the outline of the model. Model III is a simple 3D model. The data obtained by the cross observation method show the width and thickness of the model. The experiments described above indicate that the methods are applicable and the results are good.

超声波模型试验,有助于提高地震资料解释的准确性。当前三维地震勘探方法越来越多地用于寻找油气藏,因此发展三维模型试验方法,具有更为重要的意义。

近年来,物理模型试验已引起国内普遍的重视,许多单位建立了不同规模的实验室,开展了多项研究工作。

本文着重于研究模型实验的方法,并致力于通过液体模型的研究来了解地震勘探中的问题。

理论

如图1所示,当地震波入射到波阻抗分界面时,部分能量遵守反射定律,返回第一层介质中,其中

$$i = i'$$

另一部分能量进入第二层介质中，遵守斯奈尔 (Snell) 定律

$$\frac{\sin i}{\sin j} = \frac{V_1}{V_2}$$

反射波时距曲线方程为

$$t = \frac{1}{V} \sqrt{x^2 + 4h^2} \pm 4hx \sin \theta$$

其中 θ 为界面与观测面的夹角。

在两层层状介质情况下，时距曲线方程为

$$\begin{cases} x = 2h_1 \operatorname{tgi} + 2h_2 \operatorname{tgj} \\ t = \frac{2h_1}{V_1 \cos i} + \frac{2h_2}{V_2 \cos j} \\ V_1 \sin j = V_2 \sin i \end{cases}$$

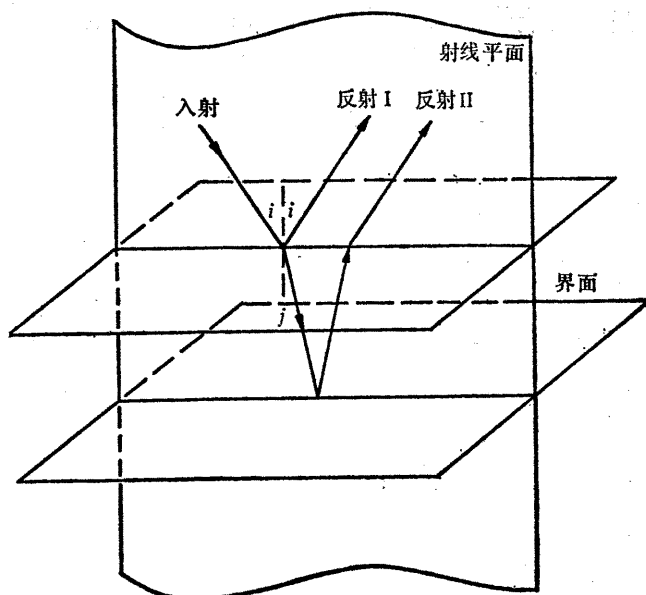


图 1 反射波原理

式中： h_1 为第一层介质厚度； h_2 为第二层介质厚度； x 为炮检距； t 为地震波旅行时； V_1 、 V_2 为第一层与第二层介质的波速。

仪器与模型

仪器

实验中采用了湖南湘潭市无线电厂生产的 SYC-2 型和 SYC-3 型声波岩石参数测定仪。发、收换能器的固有频率范围为 250kHz—550kHz。

模型

(1) 模型材料的测定 在室温 18℃ 下，准确地测得汽油、甘油、水、原油、酒精这五种实验材料的密度和波速 (见表 1)。

模型材料的物理参数

表 1

材 料	$\bar{V}_P$ (米/秒)	ρ (克/厘米 ³)	T (微秒)	备 注
水	1,453.4	0.997	3.8—4	F: 250kHz S: 550kHz
含水甘油	1,876.5	1.261		
酒 精 (纯)	1,216.2	0.789	17.4	F: 50kHz S: 150kHz
汽 油	1,200.3	0.778		
原 油	1,591.6			

〔注〕1. F、S 分别为发、收换能器；

2. 原油与水参数相近，实验中未选用

实验中使用聚乙烯塑料薄膜作为模型定型材料，此材料具有相当好的透射性。试验条件如下：

当二层液体插入一板状层, 波的透射系数为^[6]

$$D = \frac{8}{4 + (m_{12} + m_{21})(m_{23} + m_{32}) + (m_{12} + m_{21})(m_{23} + m_{32}) \cos \frac{4\pi d}{\lambda_2}}$$

式中: 1、3 为上下层液体; 2 代表中间板状层; $m_{ij} = \rho_i V_i / \rho_j V_j$; $\lambda_2 = 0.9$ 厘米(波长)。 D' 表示中间无板状层时的透射系数。

当上层为水、下层为甘油时, $D = 0.75999$; $D' = 0.76002$ 。

当上层为水, 下层为汽油时, $D = 0.60832$; $D' = 0.60835$ 。

当上层为汽油, 下层为甘油时, $D = 0.56586$, $D' = 0.56589$ 。

(2) 模型 I 的设计与制作

模型 I 如图 2 所示, 相当于一个二度含气透镜构造体。在模拟实验中, 模型的物理性质及尺寸和实际构造之间的相似性是非常重要的。本文主要研究的是方法问题, 由于受现有材料的限制, 我们只能粗略地考虑模型介质的速度、密度、几何尺寸和实际情况的相似比。实际中含气岩石的速度和密度要小于盖层岩石, 因而用汽油和水来相似模拟之、原设想用甘油来模拟盖层介质, 以便接近于实际, 但因甘油价格昂贵, 数量有限,

因而没有采用。

对于尺寸的相似性, 一般以波长为标准。实验中采用的超声波在水中传播的视周期为 3.8—4.0 微秒, 则视波长 $\lambda_1^* = 0.55—0.58$ 厘米, 而实际石油勘探中地震波视波长 λ_2^* 一般为 30—60 米之间。因而尺寸的相似比 $K_L = \lambda_2^* / \lambda_1^* = 5.4 \times 10^3 - 1.1 \times 10^4$ 间。在这次实验中, 我们取模型尺寸相似比为 1.0×10^4 , 这样, 模型设计尺寸相当于实际尺寸, 模型透镜体厚

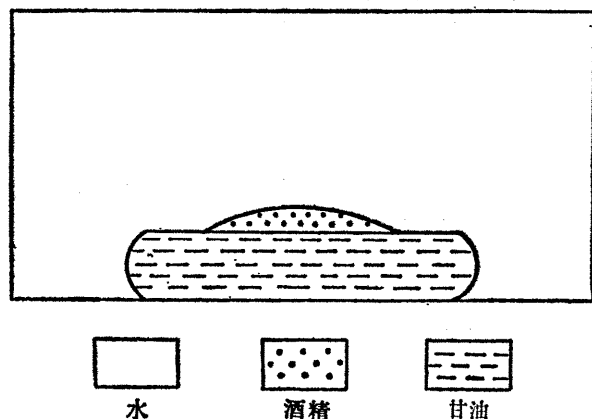


图 2 模型 I 示意图

度为 1.6 厘米, 相当于实际的 160 米, 其跨度为 11.6 厘米, 相当于实际的 1,160 米。具体数据如图 3 所示。图注中括号内的数字相当于实际的尺寸。

在制作液体模型时, 要排尽模型中的气泡和水, 以免影响实验结果。

(3) 模型 II 的设计与制作

模型 II 模拟礁块构造。袋中装甘油, 为能清晰地见到模型底部的反射波, 把它悬搁在一个装有水的大塑料袋上, 模型尺寸为 12 厘米 × 12 厘米。

(4) 模型 III 的设计与制作

模型 III 是一个长方形塑料袋 (高 5.6 厘米, 宽 25 厘米), 仍用甘油作为模型介质, 其上覆盖水层为 19.9 厘米 (模型顶面距接收平面的深度)。

实验结果

(1) 模型 I 的观测与结果

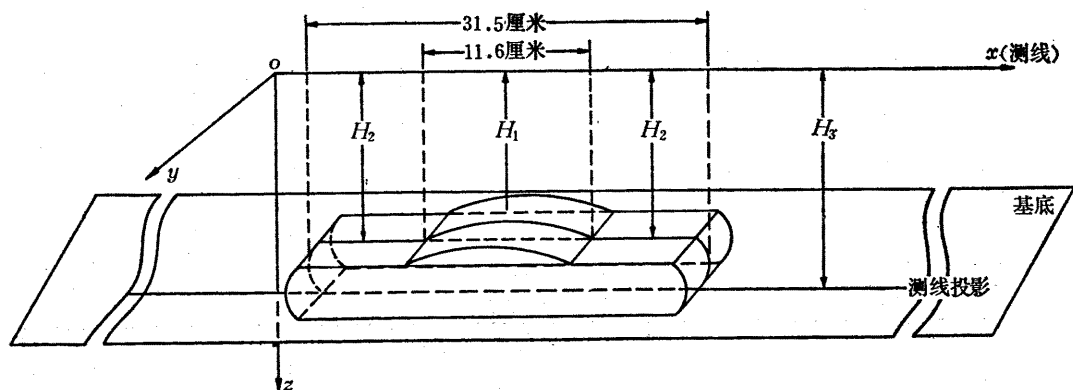


图 3 模型 I 立体示意图

$H_1=10.7$ 厘米 (1.070米), $H_2=12.3$ 厘米 (1.230米), $H_3=15.0$ 厘米 (1.500米)

模型 I 放置在 $140 \times 27 \times 25$ 厘米³ 的水槽中, 布置一条测线, 采用等间距 ($x=14$ 厘米) 激发和接收, 换能器组倾角为 15° , 详见图 3。

实验中采用同相轴追踪法, 根据反射波初至、振幅等特点, 适当地调节仪器增益、发射脉冲宽度和扫描宽度, 以有利于波的识别。

首先在模型中部进行震相识别, 并拍下反射波 P_1 、 P_2 、 P_3 (脚标代表反射层次) 的特写镜头 (图 4), 然后逐渐向模型两翼观测, 可见到 P_1 、 P_2 波时差逐渐变小而发生合并现象, 在模型两侧, P_2 波消失, 而出现 P_1' 波 (来自模型两侧的水—甘油界面的反射波), 且极性反转。整条剖面显示结果如图 5 所示。

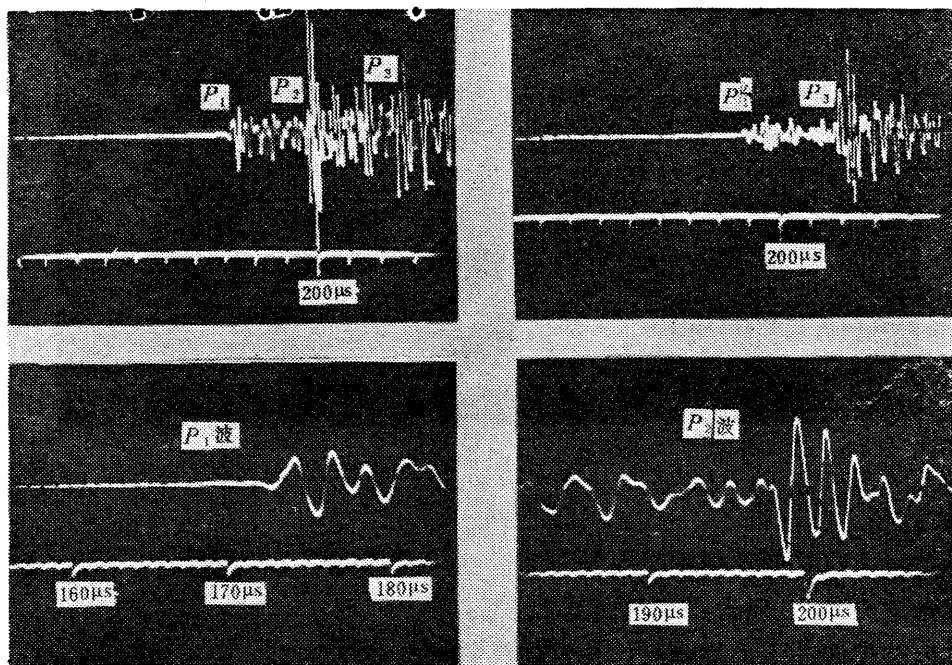


图 4 模型 I 中部的特写镜头

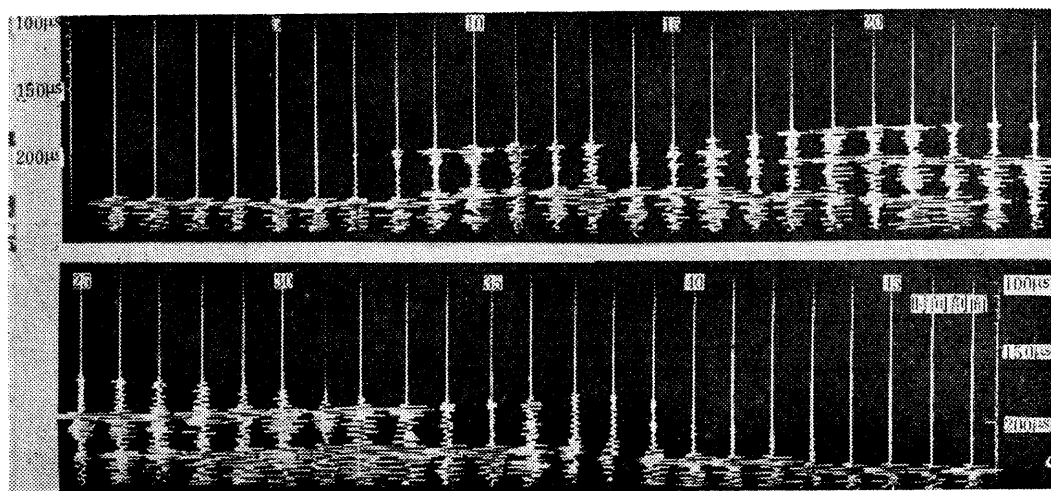


图 5 模型 I 观测剖面

由图 5 可以看到“亮点”的三个特征：剖面第 8 道至 15 道波形类同，波的初至一致向上跳，第 16 道开始，初至反转向下跳，至第 33 道后又恢复为向上跳，这种极性反转是“亮点”特征之一（详见图 6）；由于透镜体介质速度低于盖层介质速度，因而出现“速度下拉效应”，这是亮点特征之二；出现强振幅，这是亮点的基本特征。

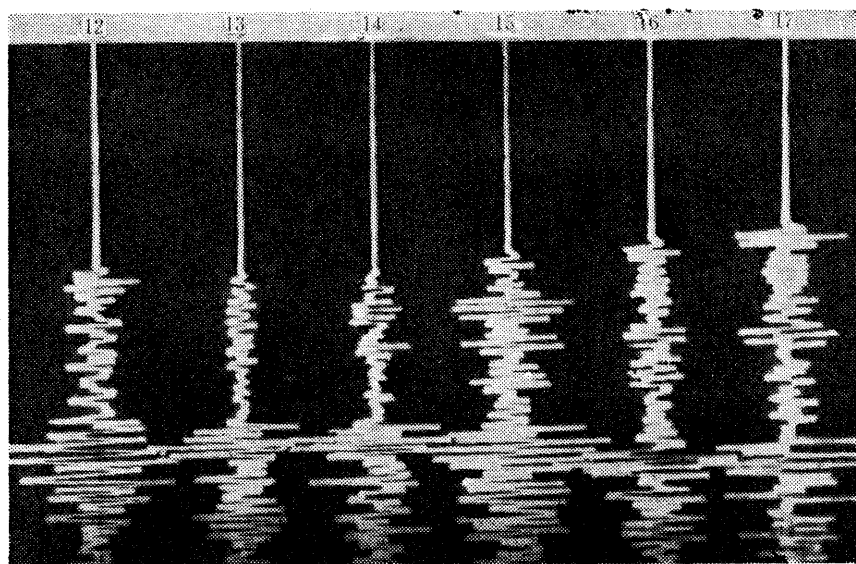


图 6 模型 I 的放大照片

(2) 模型 I 的反演

模型总宽度：从照片可读得模型总宽度占 32 道记录，即 $(32 - 1) \times 1 = 31$ 厘米，模型实际宽度为 31.5 厘米，相对误差 1.6%。

模型埋藏深度：水平界面时，由反射波的时距方程求得

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{V^2 t^2 - x^2}$$

将 $V=1,453.4$ 米/秒、 $x=14$ 厘米、基底的波至时 $t_1=227$ 微秒, 代入上式中, 可算得基底深度为 14.9 厘米, 实际尺寸为 15 厘米, 误差 0.7%。在模型两侧, $t=192$ 微秒, 代入公式可算出埋藏深度为 12.1 厘米, 实际埋深为 12.3 厘米, 误差为 1.6%。

透镜体顶面近似为水平界面, 此时可算得埋深为 10.5 厘米, 实际尺寸为 10.7 厘米, 相对误差为 1.9%。

模型厚度反演:

由公式

$$\begin{aligned} x &= 2h_1 \operatorname{tg} i + 2h_2 \operatorname{tg} j \\ t_2 &= \frac{2h_1}{V_1 \cos i} + \frac{2h_2}{V_2 \cos j} \\ \frac{\sin i}{\sin j} &= \frac{V_1}{V_2} \end{aligned}$$

消去 h_2 可得关于 $\sin i$ 的一元四次方程

$$\begin{aligned} V_1^2 V_2^2 t_2^2 \sin^4 i - 2V_1^2 V_2^2 x t_2 \sin^3 i + [4h_1^2 (V_1^2 - V_2^2)^2 - V_1^2 V_2^4 \\ + V_1^4 \Delta^2] \sin^2 i + 2V_1^2 V_2^2 \Delta t_2 x \sin i - V_1^4 \Delta^2 = 0 \end{aligned}$$

代入的数据: $V_1=1,453.4 \times 10^{-4}$ 厘米/微秒; $V_2=1,200.3 \times 10^{-4}$ 厘米/微秒; $t_2=203$ 微秒; $x=14$ 厘米; $H_1=10.7$ 厘米; $\Delta=1$ 厘米 (每观测一次后换能器移动的距离), 由此可得方程的合适解为

$$\sin i = 507.5 \times 10^{-3}, \quad i = 30.5^\circ, \quad j = 24.6^\circ$$

算得透镜体的中间厚度为 1.6 厘米 (酒精层厚), 而模型的实际尺寸为 1.7 厘米, 相对误差达 5.9%。

同理, 若代入的数据为: $V_1=1,453.4 \times 10^{-4}$ 厘米/微秒; $V_2=1,876.7 \times 10^{-4}$ 厘米/微秒; $x=14$ 厘米; $H_2=12.3$ 厘米; $\Delta=1$ 厘米, 基底波至时 $t_2=221$ 微秒, 可得合适解

$$i = 24.4^\circ, \quad j = 32.2^\circ$$

求得 $h=2.8$ 厘米 (甘油层厚), 实际厚度为 2.7 厘米, 相对误差为 3.7%。

透镜体跨度的反演:

由剖面可见, 透镜体尖灭处的反射波 (在第 15 道) 到达时为 188.6 微秒, 第 16 道到达时为 185.7 微秒, 由公式

$$\begin{aligned} h_1 &= \left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right)^{\frac{1}{2}} \\ A &= 16\Delta(-\Delta + x) \\ B &= -4[x^2 V^2 (t_1^2 - t_2^2) - 2\Delta^2 (V^2 t_1^2 - x^2)] \\ C &= -\Delta(\Delta + x)(x^2 - V^2 t_1^2)^2 \end{aligned}$$

代入数据, 可算出

$$h_1 = 12.5 \text{ 厘米}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{x^2 + V^2 t_1^2 - 4h_1^2}{4Vtx} = 78.9^\circ$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{x}{2A_1} \sin \alpha \right) = 33.3^\circ$$

$$D = \left(Vt - \frac{h_1}{\cos \beta} \right) \sin \alpha = 12.2 \text{ 厘米}$$

$$\delta = \left(Vt - \frac{h_1}{\cos \beta} \right) \cos \alpha = 2.5 \text{ 厘米}$$

式中: α 、 β 、 D 、 δ 、 Δ 所代表的意义, 如图 7 所示。

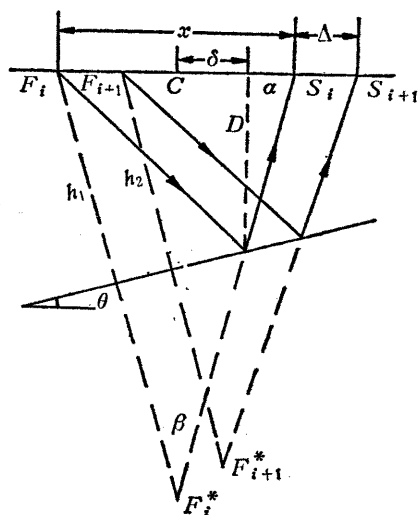


图 7 倾斜界面观测原理示意图

D 为反射点的真实深度;
 δ 为对于中点的水平偏移距

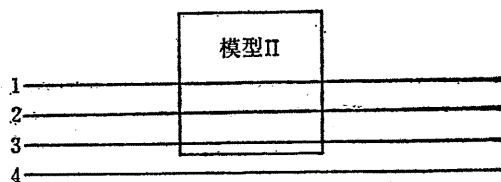


图 8 模型 II 的测线布置

1、2、3、4 为测线, 测线距为 2.5 厘米

从图 5 的 32、33 道可读得 P_1 波的到时达分别为 $t_{32} = 185.6$ 微秒, $t_{33} = 188.9$ 微秒。由上述公式可计算得: $h = 12.4$ 厘米; $\alpha = 78.4^\circ$; $\beta = 33.6^\circ$, 由此求出 $D'_1 = 12.3$ 厘米, $\delta' = 2.5$ 厘米。从剖面上可读得透镜体反射波共占 18 道, 即为 17 厘米 (未偏移归位)。按上述公式计算, 可得透镜体尖灭处水平偏移距 分别为 $\delta = 2.5$

厘米, $\delta' = 2.5$ 厘米, 则透镜体跨度 = $17 - 2.5 - 2.5 = 12$ 厘米, 实际尺寸为 11.6 厘米, 误差为 3.4%。

可见, 这些偏移公式能适合模型 I 的偏移计算。

(3) 模型 II 的观测

测线布置如图 8 所示, 观测结果如图 9 所示, 模型的反演类同于模型 I, 此处不作详细计算。从照片只能看出模型面目的一半, 若在其对称方向再布置几条测线, 我们就可以观测到模型的整体了。

(4) 三维观测法的研究

通常采用野外勘探中的十字观测法 (如图 10 所示)。在 y 轴方向上的测点间距为 2 厘米, 在 x 轴方向上激发点到测线的距离为 30 厘米。对于这样的观测系统, 一层水平界面时波传播的时距方程为

$$t = \frac{1}{V} \sqrt{30^2 + x^2 + 4h}$$

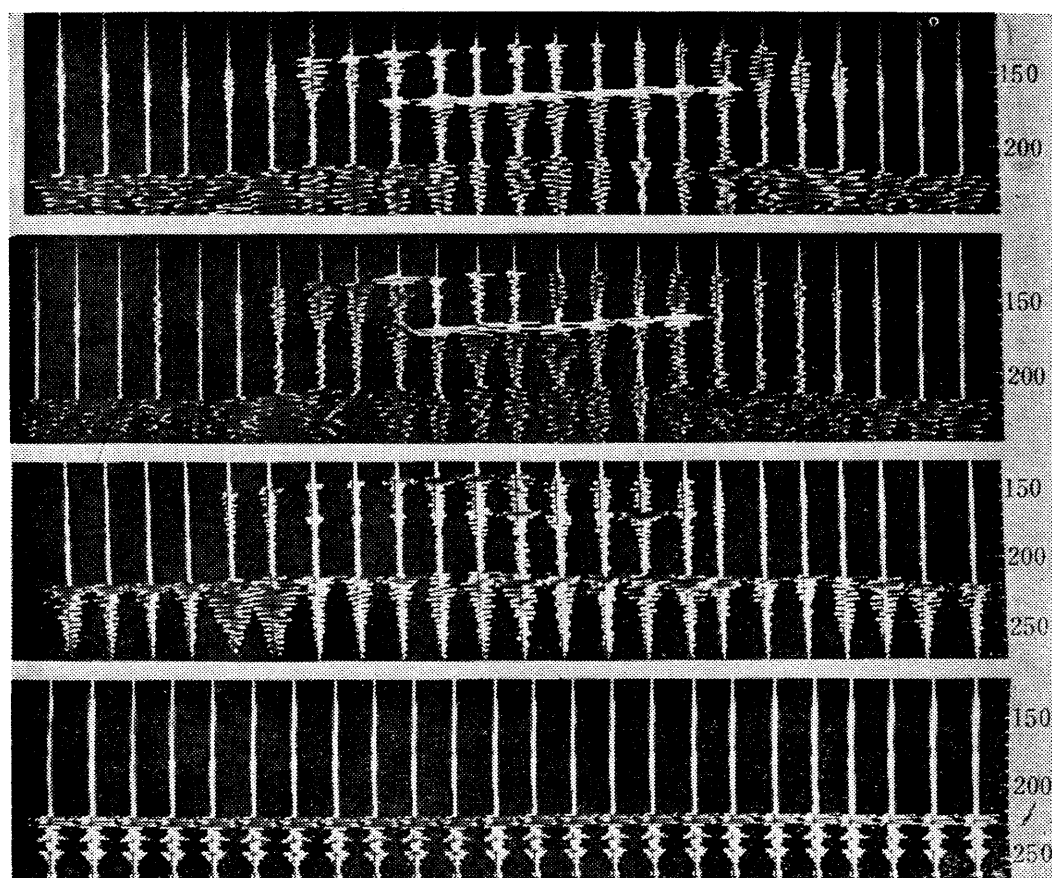


图 9 模型Ⅱ的观测记录

二层层状界面的时距方程为

$$\sqrt{x^2 + y^2} = 2h_1 \operatorname{tg} i + 2h_2 \operatorname{tg} j$$

$$t_2 = \frac{2h_1}{V_1 \cos i} + \frac{2h_2}{V_2 \cos j}$$

$$\frac{\sin i}{\sin j} = \frac{V_1}{V_2}$$

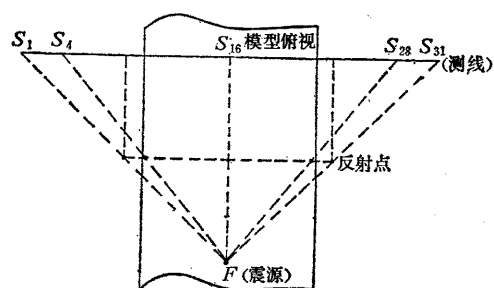


图 10 模型Ⅲ观测法示意图

$SF_{16}=30$ 厘米 (x 方向) $S_i S_{i+1}=20$ 厘米 (y 方向)

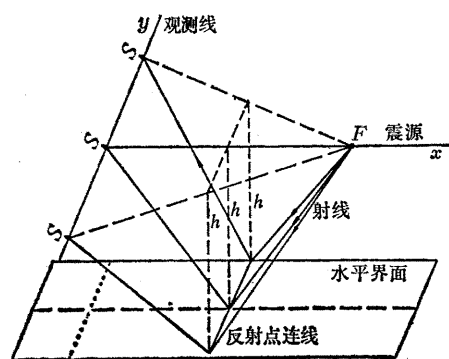


图 11 三维观测示意图

模型Ⅲ的观测是在 $80 \times 80 \times 65$ 厘米³的水槽里进行,布置了 31 个测点(如图 10 所示),逐点移动接收换能器的位置,测得模型界面各点的到达时。在此过程中,由于水槽尺寸较小,致使槽的侧面反射波造成震相识别的困难,但可用遮挡的办法消除。

模型反演计算所得的模型横向宽度为 24 厘米,模型的实际宽度为 25 厘米,相对误差为 4%。但由于时间所限,只观测了一条测线,其震相的清晰程度与模型Ⅰ、Ⅱ相同,实验结果比较成功。

结论

在上述实验条件下进行液体三维地震勘探模型的试验是成功的,结果可靠,实验的重复性和稳定性都较好,震相比固体模型的结果更为清晰,实验误差可以达到野外勘探的要求。

参 考 文 献

- [1] M. 巴特著,《地震学引论》,地震出版社,1978
- [2] J. E. White, Seismic wave radiation transmission and attenuation, McGraw-Hill, 1965
- [3] 赵鸿儒等,空气介质中三维多层模型试验方法的研究,《石油地球物理勘探》,第 3 期,1981
- [4] 史歌等,多层液体介质地震模型的试验方法,《石油地球物理勘探》,第 6 期,1982
- [5] G. H. F. 加德纳等著,吴晖等译,《三维地震勘探》,地质出版社,1982
- [6] L. 别尔格曼著,曹大文等译,《超声》,国防工业出版社,1964

(上接第 413 页)

维偏移方法,即转动偏移法。

因此,正确的三维偏移二步法是:第一步沿测线方向进行二维偏移,第二步必须使偏移后的剖面绕测线转动适当的角度,以归位到正确的空间位置上,这也是精确的三维偏移二步法。

当然,以上看法是由倾斜平界面这样一种地质模型得到的,对于曲界面地质模型是否适用,尚有待进一步研究。

参 考 文 献

- 楼锡吉,非纵测线的反射点轨迹,《石油地球物理勘探》,第 6 期,1983