

浅层地震勘探资料的算图解释法

王治华 袁明德 编著

56.292
125

科学出版社

浅层地震勘探资料的算图解释法

王治华 袁明德 编著

科学出版社

1983

内 容 简 介

浅层地震勘探资料解释工作,若采用人工分析及计算的方法,是十分烦琐的。为了简化浅层地震勘探资料解释工作,提高工效,本书作者将地震勘探的反射波法、折射波法及纵、横波法求动弹性模量的常用公式编制成算图;并在对国外介绍的平方量板法求速度的资料进行研究之后,编制了平方坐标法求解反射波资料算图。使用这套算图解释浅层地震勘探资料,解释人员不必记忆很多复杂的公式,方法简便、快速、准确。

本书可供地质、水电、交通、冶金等部门从事浅层地震勘探人员使用,亦可供有关研究人员、大专院校的有关专业师生参考。

浅层地震勘探资料的算图解释法

王治华 袁明德 编著

责任编辑 周文辅

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 8 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1983 年 8 月 第一次印刷 印张: 2 3/4 插图: 28

印数: 0001—2,100 字数: 56,000

统一书号: 13031·2326

本社书号: 3187·13—14

定价: 3.00 元

前 言

研究人工激发的地震波在地层中的传播,以勘探地层构造的方法称为地震勘探。

浅层地震勘探是相对石油地震勘探而言的,一般指工程、水文地质工作中使用的地震勘探,勘探深度大约几米—几百米。

地震勘探和其它地球物理勘探方法比较起来,能够更加详细地研究地层结构和岩土性质。近年来,在工程、水文地质工作中获得广泛应用,已取得了很好的效果。

但是,浅层地震勘探至今没有一套较好的资料处理方法,目前仍然使用石油地震勘探以前所用的人工分析及计算的方法,这些方法十分烦琐,要求解释人员作艰巨的计算工作。

为了简化浅层地震勘探资料的解释工作,我们将地震勘探的反射波法、折射波法及纵、横波法求动弹性模量的常用公式编制成算图;并在对国外介绍的平方量板法求速度的资料进行研究之后,编制了平方坐标法求解反射波资料算图,总称浅层地震勘探算图。

使用算图解释浅层地震勘探资料的特点是,简便、快速、准确。解释人员不必记忆一系列复杂公式和埋头于枯燥的计算之中。由于使用方法简单,一般地质人员都能很快地掌握使用。

地震勘探的资料解释包括三个方面:(1)从地震记录中识别及追踪有效波,进行各种校正,绘制时距曲线;(2)求得地震波在岩层中的传播速度;(3)绘制地震界面。本书不涉及第一方面,只是介绍绘制成时距曲线以后,如何使用这套算图求取地震波传播速度及绘制地震界面。

为了便于一般工程、水文地质人员更好地了解算图所代表公式和它的物理意义,正确地使用算图,在介绍用算图解释资料的方法之前,简单扼要地叙述了折射波法、反射波法的基本原理。

这套算图的初稿于一九七八年一月完成。完稿后曾寄给有关兄弟单位征求意见,并在几个野外工点试用。许多同志提供了宝贵的意见。在编制算图的过程中,原水利电力部四局的杜希哲同志给予了热情的帮助,在此一并表示深切的谢意!

我所的王建军、饶志友、金石,王列诗和邱洁华同志参加了算图的计算、绘图工作。许多同志积极支持,为编制算图出了不少力。这套算图是集体劳动的结晶。

限于我们的水平,算图及本书中缺点和错误难免。请同志们在使用过程中随时指出,以求改进。

目 录

前言	ii
一、算图制作原理	1
(一) 平行尺算图原理	1
(二) N 形算图原理	2
(三) 网络形算图原理	3
二、算图编号及精度	5
(一) 算图编号	5
(二) 算图编制精度	6
三、折射波资料的算图解释法	7
(一) 水平两层介质	8
(二) 倾斜两层介质	11
(三) 弯曲界面	14
(四) 层状介质	16
四、反射波资料的算图解释法	19
(一) 反射波时距曲线	20
(二) 求有效速度	22
(三) 绘制反射界面	25
五、反射波资料的平方坐标解释法	28
(一) 水平两层介质	28
(二) 倾斜两层介质	29
(三) 层状介质	31
六、纵、横波法求动弹性模量及泊松比的算图解释法	32
(一) 已知纵波、横波速度求泊松比	32
(二) 已知横波速度、泊松比、容重求动弹模量	33
(三) 已知纵波速度、泊松比、容重求动弹模量	34
(四) 综合运算	34
参考文献	35
附录	36
1. 误差分析	36
2. 算图各算尺量程范围的变化	36
3. 用算图图算与按公式计算比较误差表	36

一、算图制作原理

算图是一种简化运算的工具。它的制作原理是以几何作图的形式来表示函数的相互关系。

这套算图共有三种几何形式：平行尺算图、N形算图和网络形算图。以三线型平行尺算图为主。以下分别叙述其简单原理。

(一) 平行尺算图原理

如图1, 垂直于直线 l 的三条垂线 u 、 ω 、 v , 垂足分别为 E 、 F 、 G 。 u 与 v , u 与 ω , ω 与 v 的间距各为:

$$H, \frac{mH}{m+n}, \frac{nH}{m+n}$$

即, u 与 ω 和 ω 与 v 间距的比值为 $m:n$ 。

假如一条直线分别交 u 、 ω 、 v 于 A 、 B 、 C 。在梯形 $AEGC$ 中可以证明:

$$nEA + mGC = (m+n)FB \quad (1.1)$$

如果认为 u 、 ω 、 v 是三条数轴, 则 EA 、 GC 、 FB 为三条数轴上的数值: $y_1(u)$ 、 $y_2(v)$ 、 $y_3(\omega)$ 。代入 (1.1) 式:

$$ny_1(u) + my_2(v) = (m+n)y_3(\omega) \quad (1.2)$$

等式两边除以 mn :

$$\frac{1}{m} y_1(u) + \frac{1}{n} y_2(v) = \frac{m+n}{mn} y_3(\omega) \quad (1.3)$$

假设有满足关系式 $f_3(\omega) = f_1(u) + f_2(v)$ 的三个函数: $f_1(u)$ 、 $f_2(v)$ 、 $f_3(\omega)$ 。我们取:

$$f_1(u) = \frac{1}{m} y_1(u),$$

$$f_2(v) = \frac{1}{n} y_2(v),$$

$$f_3(\omega) = \frac{m+n}{m \cdot n} y_3(\omega)。$$

即:

$$y_1(u) = m f_1(u),$$

$$y_2(v) = n f_2(v),$$

$$y_3(\omega) = \frac{m \cdot n}{m+n} f_3(\omega)。$$

这样, $y_1(u)$ 、 $y_2(v)$ 、 $y_3(\omega)$ 既满足于 (1.3) 式, 又满足关系式 $f_3(\omega) = f_1(u) + f_2(v)$ 。也就是说, 如图1所示, 任意直线和互相平行的 u 、 v 、 ω 数轴相交得到的交点 A 、 B 、 C 满足

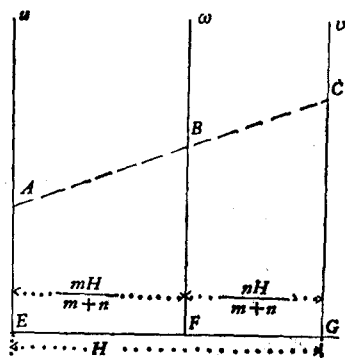


图1 平行尺算图原理

$f_3(\omega) = f_1(u) + f_2(v)$ 的关系式。

于是, 对于 $f_3(\omega) = f_1(u) + f_2(v)$ 类型的方程式, 可在直角坐标系中绘制成如下的平行尺算图:

$$u \text{ 尺: } x = 0$$

$$y_1 = mf_1(u);$$

$$v \text{ 尺: } x = H$$

$$y_2 = nf_2(v);$$

$$\omega \text{ 尺: } x = \frac{m}{m+n} H$$

$$y_3 = \frac{m \cdot n}{m+n} f_3(\omega)。$$

$$m = \frac{u \text{ 尺总长度}}{f_1(u)_{\text{最大值}} - f_1(u)_{\text{最小值}}}$$

$$n = \frac{v \text{ 尺总长度}}{f_2(v)_{\text{最大值}} - f_2(v)_{\text{最小值}}}$$

对于乘积形式的函数关系式:

$$f_3(\omega) = f_1(u) \times f_2(v)。$$

可先将等式两边分别取对数化为和差形式:

$$\lg f_3(\omega) = \lg f_1(u) + \lg f_2(v)$$

然后绘制成对数数轴的平行尺算图。

因为算图的 u, v, ω 尺都是数轴, 所以都是有方向性的。我们规定向上为正方向, 向下为负方向。负方向的算尺称为倒尺。倒尺表示负函数。图 1 中, 如果把 v 尺改画成倒尺, 则这时 u, ω, v 尺就表示 $f_3(\omega) = f_1(u) - f_2(v)$ 。

这种算图的求解方法是在 u 尺和 v 尺上点下已知函数值, 然后连接这两点的直线交 ω 尺上一点得出求解数值。这三点在一条直线上, 所以这种算图也称共线型算图。

(二) N 形算图原理

图 2 中, 两条平行线 AB, CD 及连线 AC 组成 N 形图。任意一条直线交 AB 于 E 、交 CD 于 F 、交 AC 于 O 。现在来看 E, O, F 三点的关系。

图中:

$$\triangle AEO \sim \triangle CFO。$$

设: AC 长度为 l , 则有:

$$\frac{CF}{AE} = \frac{CO}{AO} = \frac{CO}{l - CO} \quad (1.4)$$

同样可以认为 CF, AE, CO 为三条数轴 $u(CD), v(AB), \omega(CA)$ 上的数值 $y_1(u), y_2(v), y_3(\omega)$ 。数轴方向如图 2 所示。

这样, (1.4) 式可以写成:

$$\frac{y_1(u)}{y_2(v)} = \frac{y_3(\omega)}{l - y_3(\omega)} \quad (1.5)$$

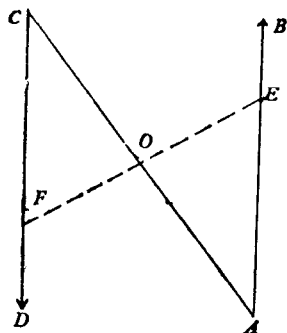


图 2 N 型算图原理

显然, (1.5) 式是 $\frac{f_1(u)}{f_2(v)} = f_3(\omega)$ 形式的函数关系式。如令:

$$y_1(u) = mf_1(u)$$

$$y_2(v) = nf_2(v)$$

$$y_3(\omega) = Qf_3(\omega)$$

代入 (1.5) 式, 并与 $\frac{f_1(u)}{f_2(v)} = f_3(\omega)$ 联立, 可求出:

$$Q = \frac{l}{\frac{n}{m} + f_3(\omega)}。$$

这样就使 $y_1(u)$ 、 $y_2(v)$ 、 $y_3(\omega)$ 既满足 (1.5) 式又满足函数关系:

$$\frac{f_1(u)}{f_2(v)} = f_3(\omega)。$$

按图 2 所示的方向作数轴, 使 N 形图中:

$$u \text{ 尺: } y_1(u) = mf_1(u)$$

$$v \text{ 尺: } y_2(v) = nf_2(v)$$

$$\omega \text{ 尺: } y_3(\omega) = \frac{l}{\frac{n}{m} + f_3(\omega)} f_3(\omega)。$$

其中

$$m = \frac{u \text{ 尺总长度}}{f_1(u)_{\text{最大值}} - f_1(u)_{\text{最小值}}},$$

$$n = \frac{v \text{ 尺总长度}}{f_2(v)_{\text{最大值}} - f_2(v)_{\text{最小值}}}。$$

这样, 便将 $f_3(\omega) = f_1(u)/f_2(v)$ 类型的函数关系式作成了 N 形算图。也即 N 形算图可以解决 $f_3(\omega) = f_1(u)/f_2(v)$ 类型的函数关系问题。

N 形算图也是一种共线型算图。

(三) 网络形算图原理

一个二元方程代表平面直角坐标系中的一条曲线; 一个三元方程代表平面直角坐标系中的一簇曲线。曲线与方程互相对应。在这里, 我们把这些曲线连同坐标轴一起称作网络形算图。对于平面直角坐标系中的一个三元方程的曲线簇, 如果任知方程中的二个变量, 我们可以求出对应的第三个变量来。

对于含有四个变量的方程式, 如:

$$f_1(t) = f_2(u, v, \omega) \quad (1.6)$$

则先把它化成二个三元方程, 这时可引入一个中间变量——介量 K , 令 $K = f_3(v, \omega)$, 用 K 代换方程 (1.6) 中的 v, ω 项, 于是方程式 (1.6) 就成为二个联立的三元方程:

$$\begin{cases} f_1(t) = F_1(u, K) \\ K = f_3(v, \omega) \end{cases} \quad (1.7)$$

先在直角坐标系中规定 K, t 为坐标轴, u 为参变量, 作出 $f_1(t) = F_1(u, K)$ 曲线簇, 然

后保持 K 轴不变,把 ν 轴改换成 ω 轴,画出介量方程 $K = f_3(\nu, \omega)$ 曲线簇,这样就得到了既满足方程式 (1.7) 也满足方程式 (1.6) 的网络图。

以上方法可以推广到对更多元的方程作网络图。

举例说明,如图3,它是一张地震勘探中以横波速度求动弹性模量的网络形算图,代表公式如下:

$$E_d = \frac{2V_s^2\gamma(1+\mu)}{g} \approx 0.204V_s^2\gamma(1+\mu) \quad (1.8)$$

其中 E_d . 动态弹性模量;

V_s . 横波速度;

μ . 泊松比;

γ . 容重;

g . 重力加速度, (取 9.8 米/秒²)。

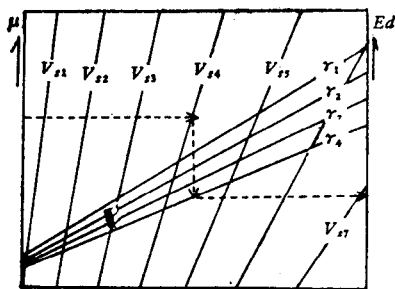


图3 由横波速度计算动弹性模量的网络形算图

令 $K = E_d/0.204\gamma$ 代入式 (1.8) 得联立方程:

$$\begin{cases} 1 + \mu = K/V_s^2 \\ K = E_d/0.204\gamma \end{cases} \quad (1.9)$$

在直角坐标系中 μ 为纵轴, K 为横轴作出 V_s^2 曲线簇(如图3)。又在以 E_d 为纵轴, K 仍为横轴的坐标系中,作出 γ 曲线簇。这二组曲线簇连同坐标轴组成以横波速度求动弹性模量算图(图3)。

了解这套算图的各种几何形式的制图原理后,我们便可以知道哪一种形式的算图解决那一类问题,而不局限于算图的算尺上已标明的物理量,从而在解释资料时正确地灵活运用。

二、算图编号及精度

(一) 算图编号

根据上述原理编制了四组共二十一张算图。

第一组 坐标

算图 1——平方坐标 (1)。纵轴及横轴均是以所标数的平方值乘模数进行刻度的。纵轴表示时间平方量,横轴表示距离平方量。

算图 2——平方坐标 (2)。与平方坐标 (1) 有不同变化范围的平方坐标。

算图 3——单平方坐标 (1)。纵轴是平方坐标轴,表示时间平方量;横轴是算术坐标轴,表示距离。

算图 4——单平方坐标 (2)。与单平方坐标 (1) 有不同变化范围的单平方坐标。

算图 5—— dx/du 计算图。这是一张透明图,图上每条射线以它的斜率表示一定的 dx/du 值,其中 dx 为计算取值间距, du 是相应 dx 间距上两接收点的地震波时间平方差: $du = t_{(x+dx)}^2 - t_{(x)}^2$ 。 dx/du 的单位是米/秒²。本图与单平方坐标 (1) 配合使用,计算反射波有效速度。

算图 6——与算图 5 有不同变化范围的 dx/du 计算图,与单平方坐标 (2) 配合使用,计算反射波有效速度。

算图 7——波速计算图(平方坐标)这也是透明图,其中每条射线以其斜率表示一定的波速 $V = \sqrt{x^2/t^2}$ 值。与平方坐标配合使用,用来计算反射层上覆地层的有效速度。

算图 8——波速计算图(算术坐标)。这也是透明图。其中的每条射线以其斜率表示一定的速度 $V = x/t$ 值,用来计算折射波视速度,与一般算术直角坐标配合使用。

第二组 折射波法解释算图

算图 9——折射临界角计算图(水平界面)。代表公式:

$$\sin i_{nk} = V_k/V_{n0}$$

算图 10——折射临界角计算图(倾斜界面)。代表公式:

$$i_{nk} = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_k}{V_{nF}} + \sin^{-1} \frac{V_k}{V_{nL}} \right)$$

算图 11——折射界面倾角计算图。代表公式:

$$\theta_x = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_k}{V_{nF}} - \sin^{-1} \frac{V_k}{V_{nL}} \right)$$

算图 12—— t_0 法求折射界面埋藏深度计算图(1)。代表公式:

$$h = \frac{V_1 t_0}{2 \cos i}$$

算图 13—— t_0 法求折射界面埋藏深度计算图(2)。代表公式同算图 12。

算图 14 —— 界面真倾角计算图。代表公式:

$$\begin{cases} \sin \theta = \sin \theta_x / \cos \alpha \\ \theta = \sin^{-1} \theta_x \end{cases}$$

第三组 反射波法解释算图

算图 15 —— 相遇时距曲线法及恒差法求有效速度计算图。它分别代表公式:

$$V_l = \sqrt{2l \frac{dx}{du} \cos 2\theta_x}$$

和

$$V_m = \sqrt{2m \frac{dx}{du}}。$$

算图 16 —— 反射面埋藏深度及视倾角计算图。代表公式:

$$h = \frac{V_l t_0}{2}; \theta_x = \frac{x_m}{2h}。$$

算图 17 —— 利用平方坐标求反射界面倾角计算图。代表公式:

$$\sin \theta_x = \frac{\Delta t^2_{(25)} V_l}{100 t_0}。$$

第四组 利用纵波、横波速度求岩土动弹性模量及泊松比计算图

算图 18 —— 已知纵波、横波速度计算泊松比计算图。代表公式:

$$\mu = \frac{\frac{1}{2}(V_P/V_S)^2 - 1}{(V_P/V_S)^2 - 1}。$$

算图 19 —— 已知横波速度、泊松比、容重求动弹性模量计算图。代表公式:

$$E_d = \frac{2V_s^2 \gamma (1 + \mu)}{g}。$$

算图 20 —— 已知纵波速度、泊松比、容重求动弹性模量计算图。代表公式:

$$E_d = V_P \gamma \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)g}。$$

算图 21 —— 动弹性模量综合计算图。这是综合上面求动弹性模量公式及求泊松比公式的一张网络形计算图。

(二) 算图编制精度

算图中,各算尺均以毫米为单位计算,计算结果的绝对误差小于 0.001 毫米。采用西德阿里斯托 (ARISTO) 精密坐标展点仪绘图,绘图误差小于 0.1 毫米。

三、折射波资料的算图解释法

折射波法概述：地震波在不同的岩土介质中具有不同的传播速度。研究表明，这些速度与介质的成份和致密程度有关。性质不同的二种岩土的分界面往往也是地震波传播速度(以下简称波速)发生突变的地方，称为地震界面(以下简称界面)。在地表附近激发的地震波向地下传播，地震波在界面上将发生反射和折射。

形象地用射线来表示波传播路径在大多数情况下是可以的。地震折射波法的基础是将光学的斯奈尔(Snell)定理推广到地震波。如图4所示，一束地震波以入射角 i_1 入射到界面上，它将在界面处发生屈折进入另一种介质，斯奈尔定理表示：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$$

此处 i_1 为入射角， i_2 为折射角， V_1 是上层介质波速， V_2 是下层介质波速。地震折射波法中所指的折射波是当 $V_2 > V_1$ 时，使得折射角 $i_2 = 90^\circ$ 的那种入射情况下，这时折射到下层介质中的地震波沿着界面以近似于 V_2 的波速滑行(如图4)。这种滑行波使界面受到振荡应力而产生二次波，二次波射线以跟入射角相等的角度折回地面，最后为检波器接收到。

我们称这种入射情况为临界入射情况，这时的人射角称为临界角，用 i_n 表示，或就写成 i ：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sin i_n}{\sin i_2} = \sin i_n$$

$$i_n = i = \text{Arc sin } \frac{V_1}{V_2}$$

根据对接收到的这种折射波的时间与炮检距的关系——时距曲线的分析就可以了解地震波沿界面滑行的特点，从而了解地层的地质情况。

地震勘探的折射波法是目前工程、水文地质勘探工作中应用很广泛的一种物探方法。它有如下特点：

1. 折射波法可以解决各种倾角、甚至直立岩层的地质勘探问题，以及发现某些拗陷、古河道、小断层等浅部构造。
2. 根据折射波时距曲线可以求得界面速度，而界面速度往往在一定程度上反映岩土的性质(致密程度、含水情况、力学特性等等)，有时也近似地把界面速度看作地层速度。
3. 折射波法不一定要要求界面十分平整，折射波时距曲线的形状经常能直观地反映界面起伏形状。
4. 折射波较表层的各种干扰波先到达接收地点，所以可以利用初至接收从地震记录上正确地追踪折射波。
5. 产生地震折射波的条件是地层波速必需逐层往下增加，如果一套地层中存在某层

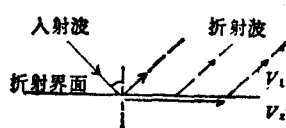


图4 折射波

高速层,它的速度比在它以下的地层速度高,并且又具有相当的厚度($h > \frac{1}{2} \lambda$)就会产生屏蔽现象,使得很难研究高速层以下的地层。

6. 折射波往往不能发现地层中的软弱夹层,而且由于软弱夹层的存在会导致对以下界面的埋藏深度估计得不正确。因此,必须经常仔细判别时距曲线的异常现象(如所谓飞线现象、反常斜率变化、突然出现的记录缺失地段等等),以便发现软弱夹层。

7. 折射波有盲区,盲区以内不存在折射波(图5)。水平二层介质的折射波盲区范围由下式表示:

$$x_0 = 2h_1 \tan i_0$$

此外,在折射波时距曲线上二条不同斜率直线相交的地方(图5),表示出临界距离:

$$x_c = 2h_1 \sqrt{\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1}}$$

在此临界距离之外,折射波首先到达地面。盲区和临界距离都取决于上覆地层的厚度和上下层介质的波速。 x_c 永远大于 x_0 。通常为了可靠地追踪折射波,总是使测线长度大大超过临界距离,以便接收到目的层的折射首波,经验表明,这时测线的长度至少为目的层埋藏深度的五到六倍。

下面分几种基本的地层情况讨论折射波的时距曲线及用算图解释这些资料的方法。运用算图是地震勘探资料解释的一个环节,只有在符合质量要求的地震记录上,经过正确分析、对比之后,才能确定选用哪一类算图予以图算。

(一) 水平两层介质

1. 时距曲线。

已知水平、平界面两层介质,地震波在上层介质中的波速为 V_1 , 在下层为 V_2 , $V_2 > V_1$ 。地面 O 点是震源。在过 O 点的测线 OX 上进行观测。在包括测线和 O 点向界面所作垂线的射线断面内,折射波行程如图5所示。界面埋藏深度为 h_1 。

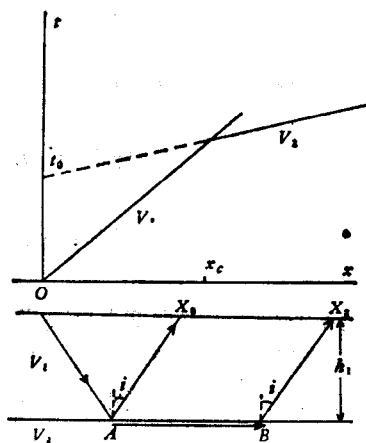


图5 折射波在水平两层介质中的行程及其时距曲线

现在来看折射波的时距曲线。在临界距离 x_c 之前将先接收到直达波,直达波时距方程式为:

$$t = \frac{x}{V_1} \quad (3.1)$$

在 $t-x$ 坐标系中,它表示一条从原点出发的斜线,这条斜线的斜率倒数就是第一层介质平均速度 V_1 。超过临界距离 x_c 之后,折射波开始以首波形式在地震记录上出现。(如果是多层介质,则直到来自更下层的折射波超过它为止。)根据图5所示的射线路程,列出折射波时距方程式:

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_1 \cos i_0}{V_1} \quad (3.2)$$

这也是一条斜线,斜线的斜率倒数表示第二层介质波速 V_2 ,斜线从盲点 x_0 起始,与直达

波斜线在临界点 x_c 处相交, 反向延长该斜线交 t 轴得到截距 $\frac{2h_1 \cos i_{21}}{V_1}$, 称延迟时间 (t_0)。

测量到达接收器的首波的方法称为初至波法。根据初至波作出时距曲线, 由以上讨论可见, 从初至波时距曲线上可以求地层波速 V_1 和 V_2 , 求界面埋藏深度 h_1 和临界角 i_{21} :

$$h_1 = \frac{V_1 t_0}{2 \cos i_{21}}; \quad i_{21} = \sin^{-1} \frac{V_1}{V_2}.$$

2. 用算图求地层波速 V_1 、 V_2

将算图 8——波速计算图(算术坐标)蒙在折射波时距曲线上, 使算图原点放在所求斜线始端, 并保持两幅图的坐标轴平行(如图 6)读出算图 8 中与时距曲线斜率最相近的那条线(相重合的那条线)上的标值, 即为所求 V 值。

3. 求折射临界角

使用算图 9——折射临界角计算图(水平界面)。在 V_k 尺上找到求得的 V_1 值①, 在 V_n 尺上找到求得的 V_2 值②, 连接①、②两点的直线交 $\sin i_{nk}$ 尺上一点③, ③点即为所求的临界角正弦值 $\sin i_{21}$, 其左侧表示相应的临界角 i_{21} 值。

举例: 已知

$$V_1 = 1000 \text{ 米/秒},$$

$$V_2 = 1600 \text{ 米/秒},$$

图算结果:

$$\sin i_{21} = 0.63, \quad i_{21} = 39^\circ \text{ (见图 7)}.$$

折射临界角计算图(水平) $\sin i_{nk} = \frac{V_k}{V_n}$

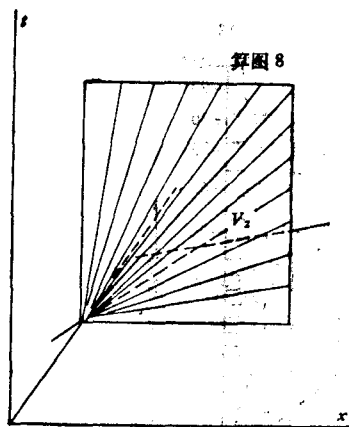


图 6 求折射波速度示意图

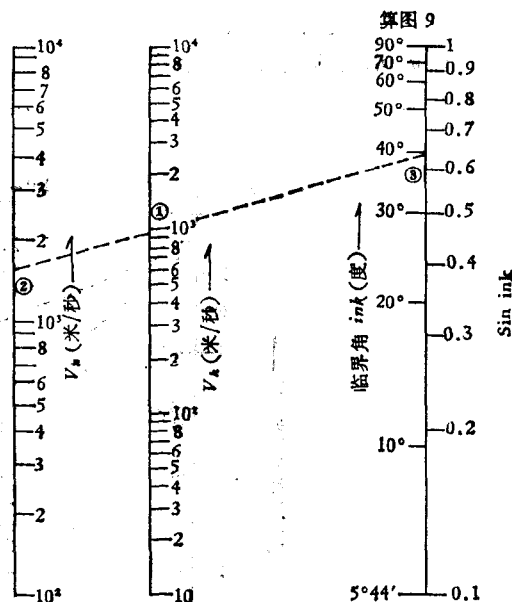


图 7 计算水平界面的折射波临界角

4. 求折射界面埋藏深度

求界面埋藏深度用算图 12—— t_0 法求折射界面埋藏深度计算图(1)或算图 13—— t_0

1) 脚码 k 表示界面上层介质的层数, n 表示界面下层的介质的层数, $n = k + 1$ 。以下如无另外说明均表示相同意义。

法求折射界面埋藏深度计算图(2)。这两张算图都表示公式:

$$h_1 = \frac{V_1 t_0}{2 \cos i_{21}} \quad (3.3)$$

算图 12 的使用方法是: 在右边的 V_1 尺上点下以上求得的 V_1 值①, 在左边的 V_2 尺上点下求得的 V_2 值②, 连接①、②交对角线 $\sin i$ 尺上一点③。再把③移到右边尺内侧相同标值处④, 同时在左边 V_2 尺上又点下 V_1 值⑤, 连接④、⑤交对角线上一点⑥。在下边 t_0

t_0 法求折射界面深度计算图(1) $h = V_1 t_0 / 2 \cos i$

尺上点下从时距曲线上求得的 t_0 值⑦, 连接⑦、⑥延长交上边的 h 尺一点⑧, ⑧点所标的 h 值即为所求解。

举例: 已知

$$V_1 = 1000 \text{ 米/秒,}$$

$$V_2 = 1600 \text{ 米/秒,}$$

$$t_0 = 40 \text{ 毫秒,}$$

图算结果: $h_1 = 25.6$ 米(如图 8)。

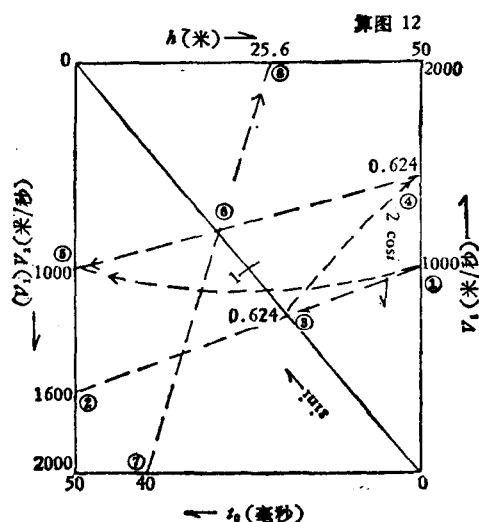


图 8 t_0 法计算折射界面埋藏深度

算图 13 的使用方法是: 分别在算图 13 的 V_1 尺、 V_2 尺、 t_0 尺上找到所求得的 V_1 、 V_2 、 t_0 值相应的点①、②、③(如图 9 所示)。连接①、②延长交右侧的 $\sin i$ 尺于一点④。把④移到稍靠左边的 $2 \cos i$ 尺上标有相同 i 数值处③', 然后再平移回 $\sin i$ 尺上得点④。连接①、⑤交中间尺右侧的 $V_1 t_0$ 尺于一点⑥, 连

$$t_0 \text{ 法求折射界面埋深计算图(2)} \quad h = \frac{V_1 t_0}{2 \cos i}$$

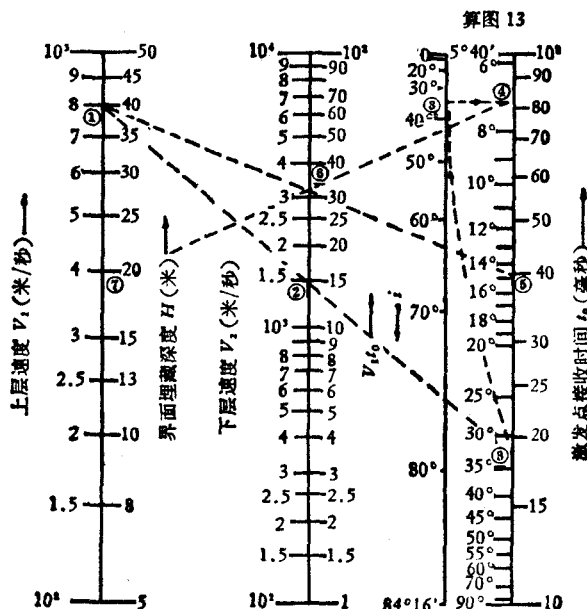


图 9 t_0 法计算折射界面埋藏深度

1) 右尺内侧为 $2 \cos i$ 尺, 它以 $2 \cos i$ 函数关系分度, 但为使用方便, 用 $\sin i$ 值标出。

接④、⑤的直线延长交 h 尺上一点⑦。⑦的标值即为所求折射界面埋藏深度。

举例：已知 $V_1 = 800$ 米/秒， $V_2 = 1500$ 米/秒， $t_0 = 40$ 毫秒。图算结果： $h_1 = 18.8$ 米(图 9)。

(二) 倾斜两层介质

1. 时距曲线

界面倾角为 θ 的平面界面二层介质， $V_1 < V_2$ 。在射线平面内，震源 O 到界面的法线深度为 h 界面视倾角为 θ_x 。由震源出发以临界角 i_{21} 入射到界面上的折射波行程如图 10 所示。往上倾方向的折射波返回地面所走的路程要比往下倾方向的稍短一些。写出它们的时距方程如下：

下倾方向一侧：

$$t = \frac{x \sin(i_{21} + \theta_x)}{V_1} + \frac{2h \cos i_{21}}{V_1} \quad (3.4)$$

在 $t-x$ 坐标中，这是一条斜率为 $\frac{\sin(i_{21} + \theta_x)}{V_1}$ 的

直线。我们称此斜率的倒数：

$$V_{1T} = \frac{V_1}{\sin(i_{21} + \theta_x)} \quad (3.5)$$

为折射波下倾方向视速度。它实际是下倾方向测线上，两个接收点之间的距离与接收时差之比。

上倾方向一侧：

$$t = \frac{x \sin(i_{21} - \theta_x)}{V_1} + \frac{2h \cos i_{21}}{V_1} \quad (3.6)$$

(3.6) 式也是直线方程。直线斜率的倒数为折射波上倾方向的视速度：

$$V_{1t} = \frac{V_1}{\sin(i_{21} - \theta_x)}$$

见图 10，比较上下倾方向的折射波时距曲线，可见，沿上倾方向的时距曲线较平缓，盲区小，临界距离也小，反向延长两边的时距曲线交 t 轴于同一点 t_0 ；

$$t_0 = \frac{2h \cos i_{21}}{V_1}$$

将 (3.4) 式与 (3.6) 式合并，写出倾斜二层介质折射波时距方程的一般式：

$$t = \frac{x \sin(i_{21} \pm \theta_x)}{V_1} + \frac{2h \cos i_{21}}{V_1} \quad (3.8)$$

方程式 (3.8) 表示一点激发，向两边展开的折射波时距线。这种在炮点两侧埋置检波器的排列称为对称观测系统。有时为了研究某一地段下面的界面情况，常常采用相遇折射系统进行观测，即在测线两端激发，相向接收(如图 11)。这种观测系统使得在同一地段既进行了一次下行观测，又进行了一次上行观测，它能够更好地反映界面情况，同时利用地震波从不同方向的传播路径，还可以判别出时距曲线上某些畸变点究竟是由于深层差异还是表层差异所造成。

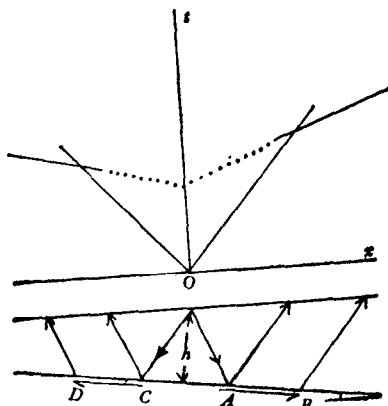


图 10 折射波在倾斜界面两层介质中的行程及其时距曲线

2. 求临界角及界面倾角

由式 (3.5) 及式 (3.7) 导出二层介质界面倾角 θ_x (视倾角) 和临界角 i_{21} 的公式:

$$\theta_x = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2F}} - \sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2L}} \right) \quad (3.9)$$

$$i_{21} = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2F}} + \sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2L}} \right) \quad (3.10)$$

用算图求临界角 $i_{21}(i)$:

在相遇时距曲线上, 用算图 8 求得覆盖层波速 V_1 和上、下倾方向的折射波视速度 V_{2L} 和 V_{2F} , 算出其比值 V_1/V_{2L} 和 V_1/V_{2F} 。也可以用算图 9 直接读出这个比值 (V_k 尺代表 V_1 , V_n 尺代表 V_{2L} 或 V_{2F} , $\sin i_{nk}$ 尺即为所求比值)。然后, 在算图 10 的 V_k/V_{nF} 尺和 V_k/V_{nL} 尺上分别找到求得的 V_1/V_{2F} 值①和 V_1/V_{2L} 值②, 连接①、②的直线交

i 尺上一点③, 即得到所求的临界角 i_{21} 。 i 尺的右侧为相应的 $\cos i_{21}$ 值 (图 12)。

举例:

已知 $V_1/V_{2F} = 0.867$

$V_1/V_{2L} = 0.5$

图算结果:

$i_{21} = 45^\circ$

$\cos i_{21} = 0.707$ 。

求界面倾角:

利用算图 11 —— 折射界面倾角计算图, 用与以上求 i_{21} 同样的方法在中间的算尺上得到折射界面视倾角 θ_x 。

举例: 已知

折射临界角计算图 (倾斜界面) $i = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2F}} + \sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2L}} \right)$

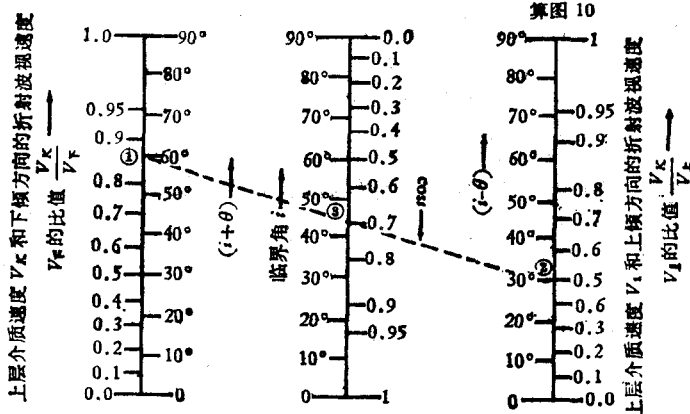


图 12 倾斜界面折射波临界角计算法

$V_1/V_{2F} = 0.867$

$V_1/V_{2L} = 0.5$

图算结果:

$\theta_x = 15^\circ$

以上求得的是沿测线 x 方向的界面视倾角。为了求界面的真倾角, 必需预知测线与地层倾向的夹角 α 。这时可用算图 14 —— 界面真倾角计算图。如图 14 所示, 把求得的视倾角 θ_x 以及已知角 α 分别点在算图 14 的 θ_x 尺上②和 α 尺上①。连接①、②延长交 θ 尺于一点③, 即得到所求的真倾角 θ 值。

举例: 已知 $\theta_x = 15^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, 图算结果: $\theta = 15^\circ 10'$

算图 14 对求折射界面及反射界面真倾角同样适用。

3. 求界面速度