

用互谱技术从长源距声波全波列测井信号中提取纵横波速度

阎树汶 吕幸端

(胜利石油管理局测井公司)

1989年11月13日收到

本文简要介绍长源距声波全波列测井的特点及意义,重点介绍用互谱分析技术提取纵、横波速度的原理和方法^[1]。所研制的软件系统,除提取纵、横波速度外,还可提取功率谱。本文还对进一步提高全波处理技术提出了看法。

一、前言

声波测井自50年代问世以来,对确定岩层孔隙度起了重要作用。但是现行技术只是用首波确定纵波速度,且该速度值存在时间扩展效应造成的误差,其他绝大部分信息也没有得到充分利用。

随着石油工业的发展,工程界计算杨氏模量、切变模量、地层张力强度、切变梯度、破裂压力等参数都需要横波速度。纵波和横波的速度及其幅度对孔隙流体粘滞性、热传导系数、裂缝

结构类型等有不同响应,因而在判别油气水层、研究裂缝形态等方面十分有用。本文介绍的方法为横波在众多领域的应用创造了条件。

按照文献^[2]的观点,接收换能器接收到的所谓横波,实际上是伪瑞利波,因此我们也考虑了将提取的横波视为伪瑞利波,并以此重新计算出横波。但这个问题国内外学者有不同看法,提供的结果只为进一步研究提供方便。

二、全波测井的声系结构

我们使用斯伦贝谢公司的长源距声波测井

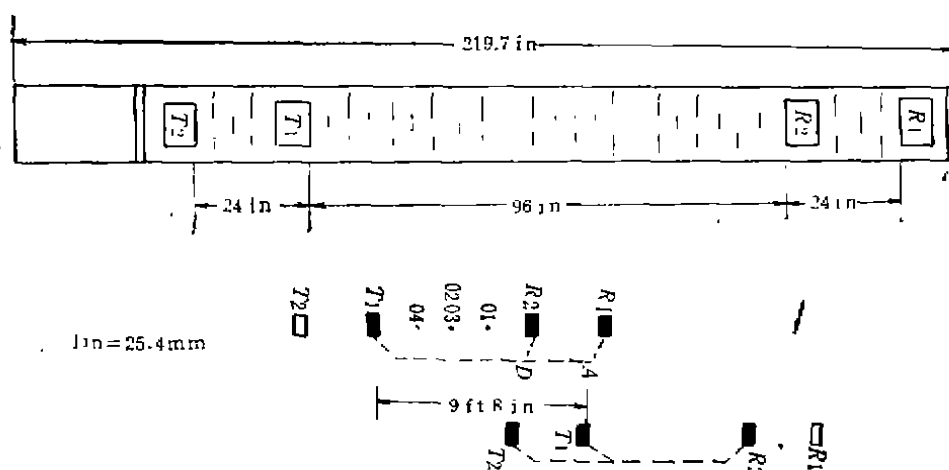


图1 声系结构示意图

仪,其声系结构如图1所示。发射换能器为 T_1 、 T_2 ,接收换能器为 R_1 、 R_2 。在每个位置可记录四个波列。 T_1 发射、 R_1 及 R_2 接收记录的波列分别为 WF_1 及 WF_2 , T_2 发射、 R_1 及 R_2 接收记录的波列则分别为 WF_3 及 WF_4 。每个波列有512个采样点。

为了达到井眼补偿的效果,用互谱法将 WF_1 与 WF_2 求得的时差与仪器上提9ft 8 in. (2.9464m)之后 WF_4 与 WF_2 求得的时差取平均。其真实意义是 A 与 D 之间的平均时差。可以看出,这样求出的时差所反映地层的位置,比短源距补偿声波测井仪提供的时差所反映的地层位置更准确,从而波速也更正确。

三、波列的基本描述

对一个波列而言,首先到达的是第一临界角入射的滑行纵波。其后是以第二临界角入射的滑行横波。随后是伪瑞利波和斯通利波等,统称为制导波。同时记录在波列数据上的还有噪声及混响声信号等。图2是从波列磁带上回放出的一个波列。在纵波没衰减完时就出现横波,横波仍存在时又有制导波迭加,因而给信号处理带来困难。在地层横波速度小于流体声速的软地层中,不存在第二临界角入射的滑行横波,本文介绍的波列分析方法也就不适用。

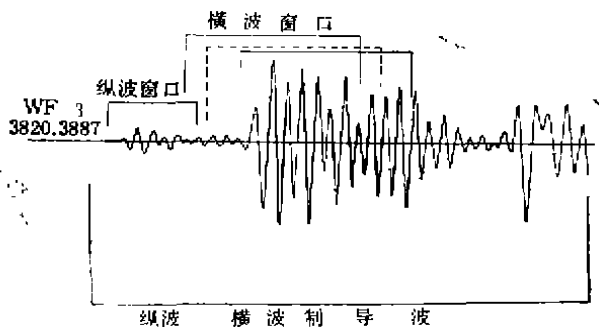


图2 全波列实例图

纵波和横波是非频散的,在处理技术上必须把握这个特性,以保证提取横波速度的可靠性。

应用声学

四、全波列谱分析原理及计算方法

1. 谱分析的基本原理^[3]

在波形分析中,可以用傅里叶变换求全波列的谱。全波列测井资料实际是离散数据,离散傅里叶变换的表达式为:

$$\hat{S}(\omega_K) = D \sum_{r=0}^{N-1} f_r \cdot (e^{-j2\pi(N)})^K \quad (1)$$

式中 $K = 0, 1, 2, \dots, N-1$; D 为采样时间间隔; f_r 为采样点值。

$$|\hat{S}(\omega_K)| = \sqrt{[R_s \hat{S}(\omega_K)]^2 + [I_s \hat{S}(\omega_K)]^2} \quad (2)$$

$$\varphi(\omega_K) = \arctg \frac{I_s \hat{S}(\omega_K)}{R_s \hat{S}(\omega_K)} \quad (3)$$

式中 $|\hat{S}(\omega_K)|$ 为波列的幅度谱; $\varphi(\omega_K)$ 为波列的相位谱。

在深度坐标上的某个位置,同时记录四个波列,每个波列要开若干个窗口作傅里叶变换。为了提高计算速度,用快速傅里叶变换实现谱分析。

2. 用相位差计算相位慢度的基本原理

相位慢度即为单频波速倒数。根据声系结构,两发射器之间与两接收器之间的距离是等同的,用 S_r 表示。在分析时,两接收器接收来自同一发射器的声信号与同一接收器接收来自两个发射器的声信号是等效的。

在下发上收情况下,首波到达上接收器时间为 t_1 ,到达下接收器时间为 t_2 。在两个波列上各开一个窗,两个窗口的时间差为 $DTW = t_1 - t_2$,称之为窗口移动。令 Δt 表示相位慢度,经推导得:

$$\Delta t = \frac{DTW + \Delta\varphi/2\pi f}{S_r} \quad (4)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为近、远两接收器接收信号谱的相位差, f 是波的频率。式(4)即为计算相位慢度的基本公式。

3. 计算参数的选取

(1) 采样时间间隔的选取

数据采样时间间隔由截止频率决定,即

$$D \leq 1/2f_c \quad (5)$$

式中 f_c 是截止频率。通常 D 取为 $5\mu s$ ，此时 $f_c = 100\text{ KHz}$ ，而纵波和横波的实际频率为 $10\text{--}20\text{ KHz}$ 之间，这样的 D 足以满足要求。仪器每个波列 512 个点的记录格式是固定的，可选择合理的时间延迟，适当增加 D ，以保证各种类型波列完整的记录下来。

(2) 窗口的选取

设频率分辨率为 $f\delta$ ，窗口取样点数 N 和频率分辨率的关系为：

$$N \geq 1/Df\delta \quad (6)$$

在 D 一定的情况下，根据谱分析的实际需要和计算机的处理能力适当选取 N 。

4. 深度对齐处理

斯仑贝谢公司采用等时采样。因受测速、遇阻(卡)等井下复杂因素影响，实际的波形分析涉及的各波列资料深度不一致，且不等距，甚至有重叠并段资料。仪器上提 9 ft 8 in. 之后用谱分析求出的时差所对应的位置比仪器上移前 WF_2 所对应的位置(即仪器中点位置)浅 5 ft. (1.524 m)。为了井眼补偿及输出结果与其他深度系统资料相匹配的需要，应对波列资料进行深度对齐处理。

(1) 等距化处理

根据测井解释的需要，按 0.125m 的深度间隔将波列数据等距化，为了提高插值时波列信息的保真度，在上下两深度波列上开适当窗口

相关对比求出两波列对应时间座标，再用插值公式得到目的点用波列有用信息求出的新波列。

(2) 深度对齐

将等距化后仍具有 5 个深度系统的波列资料以 WF_2 为标准对齐深度，将多个深度系统的资料统一到常规测井信息采集的深度上来。

五、全波处理方法

1. 纵波时差的提取

从全波列中计算纵波时差的步骤如下：

(1) 用阈值检测技术确定首波。

(2) 在首波附近选择时间窗口。为了降低傅里叶变换的旁瓣，用汉宁窗开窗^[4]。窗口几乎包括所有的纵波。

(3) 对近、远波列窗口内的信息做快速傅里叶变换，然后计算互谱：

$$C(f_k) = \hat{S}_n(f_k) \cdot \hat{S}_a^*(f_k) \quad (7)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

式中的 $*$ 表示复数的共轭，用 (7) 式达到了近、远窗口相位相减的目的。为了求得井眼补偿效果的声波时差，取 WF_1 与 WF_2 、 WF_3 与 WF_4 、 WF_5 与 WF_2 、 WF_3 与 WF_1 四个波形对，分别计算互谱。

(4) 根据互谱峰值频率、相位(即近、远波列窗口内信号谱的相位差)和窗口移动，根据公

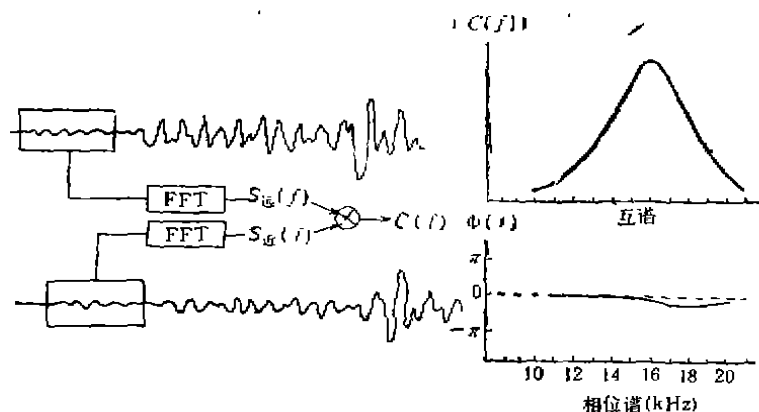


图 3 纵波处理过程

式(4)计算纵波时差 Δt 。

图3是某深度点纵波处理过程实例。

将某深度点 WF_2 与 WF_1 的互谱求得的 Δt 与仪器上提 9ft 8in. 之后 WF_2 与 WF_1 的互谱求得的 Δt 求平均, 即得到井眼补偿的纵波时差。

2 横波时差的提取

横波时差的提取比纵波时差的提取麻烦, 主要是因为纵波及制导波分别叠加在横波的前部及后部, 使信号变复杂, 波至不明显。提取横波时差的具体步骤如下:

(1) 根据纵波时差 Δt 在近波列上开横波时间窗口, 计算出频谱。

(2) 在远波列上开若干个窗口(如图4), 分别求出频谱。将近波列谱与远波列谱共轭相乘, 利用公式(2)和(3)得出互谱的幅度谱和相位谱, 从而得出近、远波列各频率成分之相位

差。

(3) 对每个频率成分确定相位差为零窗口的移动(即零相位窗口移动)。

(4) 确定零相位窗口移动基本一致的范围(即一致频带), 由此确定了非频散横波的频率范围。在若干个一致频带中选择相位差基本为零的窗口移动值, 由此对应的窗口移动作为重新进行傅里叶变换的最佳窗口移动。

(5) 在远波列最佳窗口位置开窗, 重新做傅里叶变换, 求出近、远波列的互谱。在一致频带对应的频率范围内计算各频率成分的相位差。

(6) 按(4)式计算一致频带内各频率成分对应的时差并求平均值。将 WF_2 与 WF_1 互谱求得的时差与仪器上提 9ft 8in. 之后 WF_2 与 WF_1 互谱求得的时差取平均, 便得到井眼补偿的横波时差。

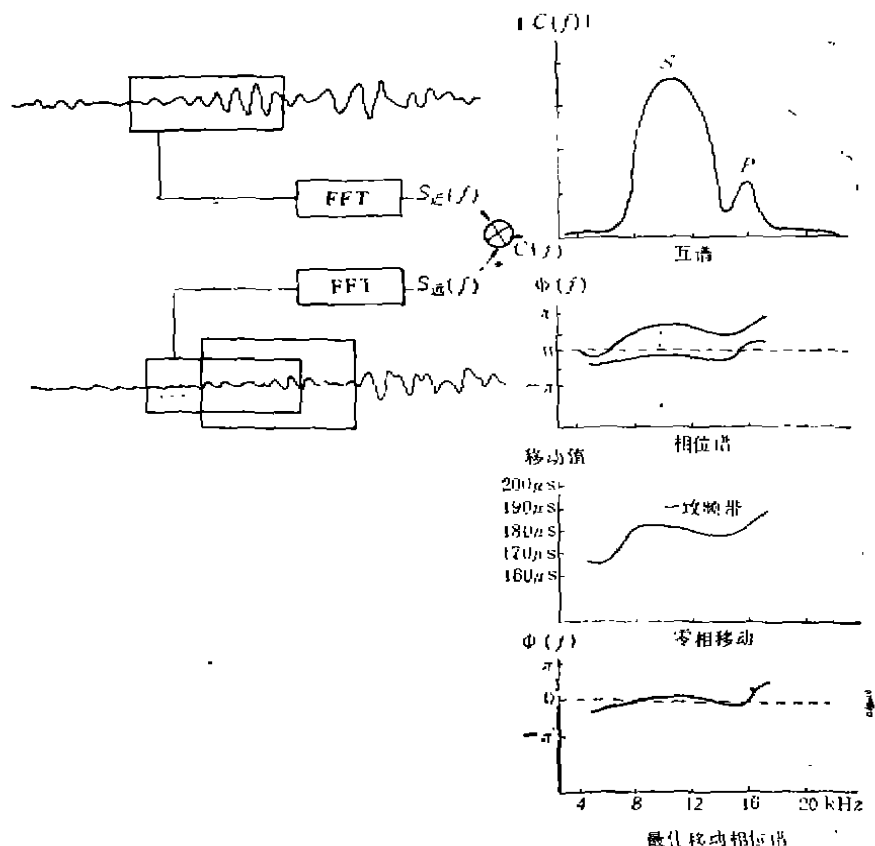


图4 横波处理过程

图4是某深度点横波处理过程的实例。

特别需要指出的是,按文中所述步骤,将 WF_4 与 WF_3 的互谱求出的时差与仪器上提 9 ft 8 in. 之后 WF_1 与 WF_3 的互谱求出的时差取平均,便得到探测较深的纵波时差和横波时差。这对于研究泥浆侵入对波的传播的影响有重要意义。

3. 功率谱的计算

窗口位置确定之后,可分别求出纵、横波四个波形对的功率谱和幅度谱。将四道功率谱求平均即分别得到纵波的平均功率和横波的平均功率。

4. 把提取的横波视为伪瑞利波重新计算横波

关于这个问题参考文献^[1](参看本文前言末段)已有论述,本文仅作简单介绍。

设 V_R 为伪瑞利波速度, V_S 为横波速度,它们之间的关系满足下列方程式:

$$\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + 8\left(\frac{2-\sigma}{1-\sigma}\right)\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - \frac{8}{1-\sigma} = 0 \quad (8)$$

式(8)的近似解是:

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \quad (9)$$

式(8)和(9)中的 σ 为泊松比。

在各向同性的介质中,泊松比与纵波、横波速度的关系是:

$$\sigma = \frac{0.5(V_L/V_S)^2 - 1}{(V_L/V_S)^2 - 1} \quad (10)$$

由(10)式得:

$$\frac{V_e}{V_s} = \left[\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma} \right]^{1/2} \quad (11)$$

由(9)、(10)、(11)式可列出泊松比 σ 与 V_e/V_R 、 V_e/V_s 的关系表,用插值程序可求出新的横波。

总之,由于横波速度的提取,为有关领域的研究奠定了基础。采用横波速度计算孔隙度,使其准确度大为提高。用纵、横波速度比的变化可以判断油气水层,用该技术处理孤北×井,根据纵、横波功率谱的特征,结合波形图象确定有高角度裂缝井段,据纵、横波速度比的变化判断为油气层,经测试获得了高产油气流。

六、结 束 语

在地层横波速度小于井眼内流体声速的情况下,横波速度不能直接提取,必须采用其他方法。在声信号衰减严重的部位存在周波跳跃,提高仪器灵敏度及发射换能器声功率也许会使其减少;有效的减少或避免周波跳跃对全波的应用是非常有益的。

参 考 文 献

- [1] Ingram J. D., Morris C. F., Macknight E. E. and Parks T. W., *Geophysics*, 50-11 (1985), 1746-1755.
- [2] 冯世喧,华东石油学院学报, 1(1978), 18.
- [3] 布赖姆, E. O. 快速傅里叶变换, 上海科学技术出版社, 1979, 108-184.
- [4] 奥本海姆 A. V., 谢弗, R. W. 数字信号处理, 科学出版社, 1983, 147.
- [5] 楚泽涵, 苏道宁, 华东石油学院学报, 9-1(1985), 27-32.

第五届全国语音、图像、通信信号处理学术会议即将召开

中国声学学会语言、听觉和音乐声学分科学会及北京声学学会和中国电子学会、中国仪器仪表学会、信号处理学会语音图像通信专业委员会,联合主办第五

届全国语音、图像、通信、信号处理学术会议,定于1991年第四季度在湖南大庸市举行。

(张家骥)