

一种声波阵列发射探头的设计

法林 马鸿飞

(西安石油勘探仪器总厂测井研究所) (西安电子科技大学)

摘要

本文论述了用地层的声波速度来自动控制阵列发射探头发射的声束偏转方向的基本原理。在测井过程中,这种阵列发射探头发射的波束能量分布能够始终处于最佳方向角,使接收的纵波首波信号大大增加,从而解决了由于源距长而造成的接收纵波首波信号过小的这一关键性问题。

关键词: 声波测井仪 声发射 声波阵列仪 设计

一、前言

常规声波测井仪采用的声波发射探头,其谐振频率是18~20kHz。长源距声波测井仪发射探头发射的声波信号,经地层传输到声波接收探头,由于走的声程远,衰减大,接收的声波信号不能满足实际测井的需要。而依靠降低发射探头的谐振频率来提高发射的声波穿透地层能力的方法,又有一定的局限性,为此,我们采用移相法原理,用所测地层的声波速度来自动控制声波阵列发射探头(SATS)发射的声波束偏转方向,就能使发射的波束能量分布处于最佳方向角,并使接收的纵波首波信号大大增强。

二、基本原理

图1是声波从裸眼井的泥浆中入射到地层中的物理模型。根据几何声学折射定律,可以得到

$$\frac{V_m}{V_f} = \frac{\sin\theta_m}{\sin\theta_f} \quad (1)$$

当声波以入射临界角入射时, $\theta_f=90^\circ$, (1)式变为

$$\sin\theta_m = \frac{V_m}{V_f} \quad (2)$$

式中 V_m 和 V_f 分别表示泥浆和地层的声速。

设声波阵列发射探头(SATS)由 $n+1$ 个压电晶体组成,它们沿井下仪器的轴中心线以间隔 d 顺序排列,相互之间以电延迟线连接。图2是SATS在单一均匀介质中用移相法控制发射的声束偏转方向的物理模型。据此可得到声束方向偏转角为 $\theta = \sin^{-1} \frac{x}{d} = \sin^{-1} \frac{V_f t}{d}$ 。



图1 声波测井物理模型

Fig.1 A physical model of sonic logging

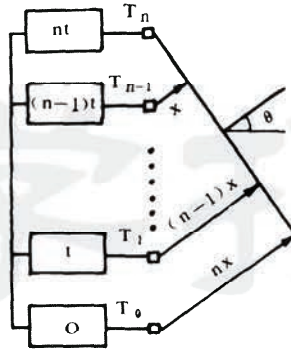


图2 SATS控制发射声束方向偏转的物理模型

Fig.2 A physical model of controlling direction shift of transmitted sonic beam

式中 v 是介质的声波传播速度。当 d 和泥浆声速为确定值时,要使声束方向偏转角 θ 为泥浆到地层的入射临界角,显然只能由压电晶体之间的激发延迟时间 t 确定。地层不同,其声速就不同,入射临界角也就不同。我们利用地层的声波传播速度来调节发射的声波波束方向偏转角 θ ,使其变为入射临界角。下面对裸眼井的声波测井模型,进行3种情况的分析讨论。

(1) SATS中的压电晶体之间,总的激发延迟时间 nt 小于任一压电晶体发射的声波传播到井壁所需要的时间 t_1 ,即井眼直径大的情况。

图3表示SATS中的全部压电晶体都发射了声波,但第0号压电晶体 T_0 发射的声波 S_0 还没有传播到井壁。第 i 号压电晶体 T_i 发射的声波 S_i ($i=0, 1 \dots n$)比第 $i+1$ 号压电晶体 T_{i+1} 发射的声波 S_{i+1} 在泥浆中多走的声程是

$$x = a \sin \theta_m \tag{3}$$

将(2)式代入(3)式得到

$$x = a \frac{V_m}{V_f} \tag{4}$$

所以,压电晶体之间的激发延迟时间是

$$t = \frac{x}{V_m} = d \frac{V_m}{V_f} / V_m = \frac{d}{V_f} \tag{5}$$

则从 T_0 开始激发发射声波到 T_n 激发发射声波所需总的延迟时间是

$$t_0 = nt = n \frac{d}{V_f} \tag{6}$$

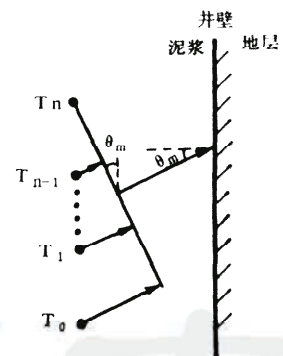


图3 $t_1 > nt$ 时,声波还没有到达井壁的情况

Fig.3 When $t_1 > nt$, sonic wave dose not reach the borehole wall

图4是SATs发射的声波从泥浆入射到地层中的情况。当第0号压电晶体 T_0 发射的声波 S_0 从 a 点传播到 a_1 点时,第1号压电晶体 T_1 发射的声波 S_1 从 b 点传播到 b_1 点。由图4可知,线段 $aa_1 = bb_1$,所以有 $b_1b_3 = x$ 。又知 $a_1b_3 = d$,由(5)式知道, S_0 从 a_1 点传播到 b_3 点时, S_1 也传播到 b_3 点。在 b_3 点, S_0 和 S_1 同相位迭加。同理,当 $S_0, S_1 \dots S_{n-2}$ 的同相位迭加波传播到 C_5 点时,第 $n-1$ 号压电晶体 T_{n-1} 发射的声波 S_{n-1} 也传播到 C_5 点。

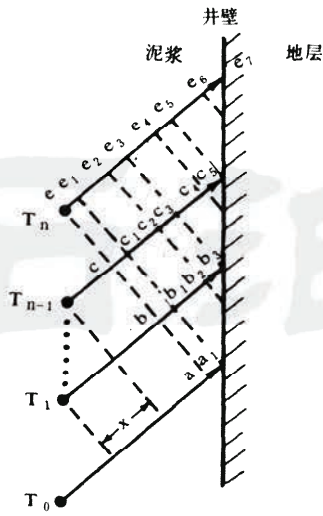


图4 $t_1 > nt$ 时, 声波从泥浆到达井壁的情况

Fig.4 When $t_1 > nt$, sonic wave reaches borehole wall

在 C_5 点, $S_0, S_1 \dots S_{n-2}$ 组成的同相位迭加波与 S_{n-1} 同相位迭加。当 $S_0, S_1 \dots S_{n-1}$ 组成的同相位迭加波传播到 e_7 点时, T_n 发射的声波 S_n 也传播到 e_7 点。在 e_7 点, $S_0, S_1 \dots S_{n-1}$ 组成的同相位迭加波与 S_n 同相位迭加。在 e_7 点以后, $S_0, S_1 \dots S_n$ 以同相位迭加波的形式在地层中传播。

(2) *SATS* 中的压电晶体发射的声波传播到井壁所需要的时间 t_1 大于压电晶体之间的激发延迟时间 t , 但 t_1 小于或等于压电晶体总的激发延迟时间 nt , 即井眼直径中等的情况。图5表示, 第0号压电晶体 T_0 发射的声波 S_0 传播到 a 点时, 第1号压电晶体 T_1 开始发射声波 S_1 。当声波 S_0 从 a 点传播到井壁 a_1 点时, 声波 S_1 传播到 b_1 点。由图5可知, 线段 $T_1b_2 = b_1b_3 = x$ 。又知线段 $a_1b_3 = d$ 。由(5)式知道, S_0 从井壁的 a_1 点传播到井壁上的 b_3 点, 同时 S_1 也从 b_1 点传播到 b_3 点。在 b_3 点, S_0 和 S_1 同相位迭加。以下过程同前述一样, 不再重复。在井壁 e_3 点以后, $S_0, S_1 \dots S_n$ 以同相位迭加波的形式在地层中传播。

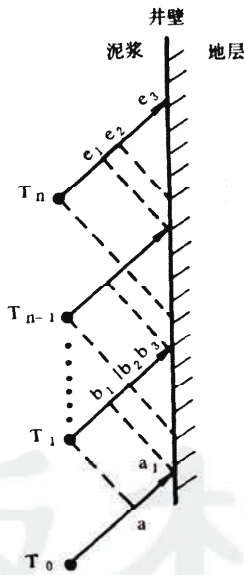


图5 $t < t_1 < nt$ 时, 声波从泥浆到达井壁的情况

Fig.5 When $t < t_1 < nt$, sonic wave reaches borehole wall through mud

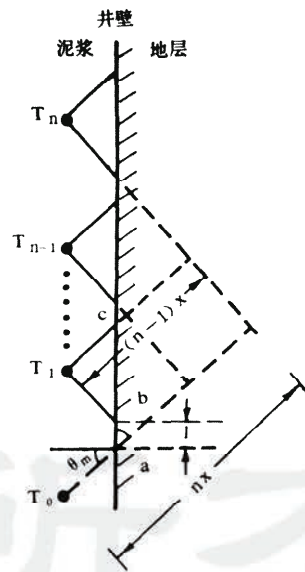


图6 $t_1 < t$ 时, 声波从泥浆到达井壁的情况

Fig.6 When $t_1 < t$, sonic wave reaches borehole wall through mud

(3) 图6表示*SATS*中的压电晶体发射的声波传播到井壁所需要的时间 t_1 小于压电晶体之间的激发延迟时间 t , 即井眼直径小的情况。如果 T_0 发射的声波 S_0 , 以临界角从泥浆入射到地层并传播到 b 点所需要的时间, 等于压电晶体之间的激发延迟时间, 则必须满足关系

信息 V_f 经电缆反馈到 HDLC, 再输至到 $\frac{d}{V_f}C$ 计算激发相对延迟时间 $t = \frac{d}{V_f}$ 。计算出的 t 值再输至到 FDC。当第二个激发脉冲到来时, T_0, T_1, \dots, T_n 以相对延迟时间 t 依次激发发射声波。它们发射的声波进行同相位迭加, 以同相位迭加波的形式在地层中传播, 以下过程同上所述。它们之间的不同点是在测井开始时, 即在激发脉冲的第一个周期里, 是用人工赋予所测地层的估计声速 V_{f0} 调节 SATS 发射的声波波束方向。而在第二个和以后的激发脉冲周期里, 则是根据测量的地层声速信号, 求出值 $t = \frac{d}{V_f}$ 来自动调节 SATS 中压电晶体之间的激发延迟时间, 从而调节 SATS 发射的声波波束方向, 使其处于最佳方向角, 从而使得声波接收探头 R 接收的声波信号最大。如果是用地层的纵波速度来调节 SATS 中压电晶体之间的激发延迟时间, 则 R 接收到的纵波信号最大; 如果是用地层的横波速度来调节 SATS 中压电晶体之间的激发延迟时间, 则 R 接收的横波信号最大。

可以看出, 上述自动控制是异步的, 即是用上一个激发脉冲周期里所测量的地层声速信号来调节目前激发脉冲周期里 SATS 发射的声波波束的偏转方向。我们知道, 测井时电缆的上提速度一般为 1000m/h, 声波的激发周期为 20ms。在一个激发脉冲周期内, 井下仪器只上提了 0.56cm, 所以, 这种自动控制的异步影响对测井来说是可以忽略的。

四、实验结果及分析

在实验中, 所使用的 SATS 是由间距 d 为 8.2cm 的 4 个圆管状的锆钛酸铅压电晶体组成。声波接收探头 R 是一个圆管状钨镉压电晶体。它们的谐振频率都是 20kHz。声系的源距是 3.048m。在内径为 13.5cm, 外径为 14.2cm 的钢管充满的条件下, 测量出的声波接收探头 R 接收的纵波首波幅度 $HWAS$ 与 SATS 中压电晶体之间的相对激发延迟时间 t 的关系曲线如图 8 所示。可以看出, 在 $t = 15\mu s$ 时, 接收的纵波首波幅度 $HWAS$ 最大。钢管的声速为 5460m/s, 计算出的压电晶体之间的激发延迟时间的理论值是 $t = \frac{8.2cm}{5460m/s} = 15.02\mu s$ 。所以实际测量的结果和理论推导的结果相符。在用钢管的纵波声速来调节 SATS 中压电晶体之间的激发延迟时间时, SATS 中压电晶体个数 n 与被接收的纵波首波幅度 $HWAS$ 的关系是, 被接收的纵波首波幅度随着压电晶体的个数 n 的变化而变化。当 $n = 1$ 时, $HWAS$ 等于 56.25mV; $n = 2$ 时, $HWAS$ 为 125mV; $n = 3$ 时 $HWAS$ 为 172.5mV; $n = 4$ 时, $HWAS$ 为 202.5mV, 约为 $n = 1$ 时的 4 倍, 能够满足实际测井的需要。

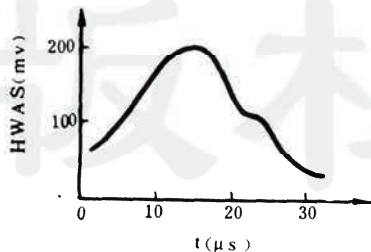


图 8 激发延迟时间和接收的 HWAS 的关系曲线

Fig.8 Relation between delay firing time and received HWAS

在石油测井中, 泥浆的声速为 1600m/s 左右, 声速最快的地层是白云岩, 其纵波声速是 7900m/s, 入射临界角是 $11^{\circ}41'$ 。声速最慢的地层是泥岩, 其纵波声速是 1800m/s, 入射临界角是 $62^{\circ}44'$ 。美国斯伦贝谢公司生产的长源距声波测井仪, 采用的是 $17\mu s$ 固定延迟双磁致

伸缩换能器组合声波发射探头，其声能量辐射指向性图如图9。图10是作者通过测量得到的声波阵列发射探头SATS在几种典型地层入射临界角方向的声能量辐射指向性图。图9和图10的区别是：17 μ s固定延迟双组合发射探头发射的声能量指向分布是固定的，不随地层的变化而变化；而SATS用所测地层的声波速度来控制它发射的声波波束偏转方向，使SATS在测井过程中发射的声能量分布的最大值随着地层的变化而变化，始终处在从泥浆到地层的入射临界角方向上，使接收的声波信号最大。显然，声波阵列发射探头SATS具有较好的性能。

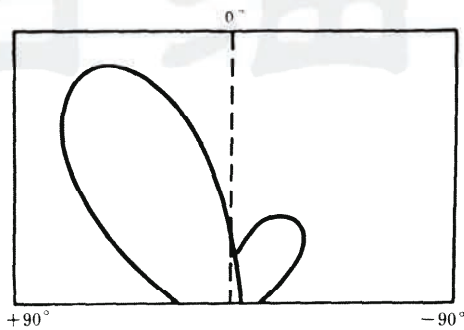


图 9 17 μ s固定延迟双磁致伸缩换能器组合探头的声能量辐射指向性图

Fig.9 Direction of sonic energy transmitted by a double constitution sonde. It consists of two magnetic deformation transducers which are fired at interval of 17 us

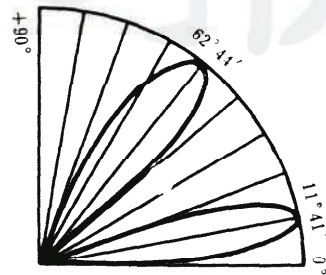


图 10 SATS发射的声能量指向性图
Fig.10 Direction of sonic energy transmitted by SATS

(本文收到日期1989年10月21日)

(编辑 康剑)

DESIGN OF A NEW TYPE OF ARRAY TRANSMITTING SONIC SONDE

Fa Lin

(Logging Institute, Xian Eactory of Petroleum Geophysical Exploration)

Ma Hongfei

(Xian University of Electronic Science and Techr-logy)

Abstract

This paper discusses the basic principle of the sonic array transmitting sonde(SATS).The path of the sonic wave travelling is long in the long spacing sonic logging,thus, the sonic signal received is fairly weak and dose not satisfy the need requirement of logging in practice. According to the principle of the phase shifting, the sonic energy distribution of the sonic beam transmitted by SATS is in a best direction angle.Thus, the received signal of head wave is increased to a great extent.