

Y₄₋₁型数字磁带测井仪

及其性能试验

(煤炭部物探攻关队测井组)

Y₄₋₁型数字磁带测井仪(以下简称Y₄₋₁仪)是七机部704所和大庆油田协作研制成功的我国第一台国产数字测井仪。经我们组配套后于1979年在煤钻孔中作试验取得了初步效果。Y₄₋₁仪虽然与国外数字测井仪有相当大的距离,但它是我国煤田测井中使用的第一台数字测井仪,特向煤测井工作人员介绍。

一、Y₄₋₁仪概况

1. 工作原理

Y₄₋₁仪主要由控制面板、交换子、对数编码器、匹配器、数字磁带机、解调解码及深度显出器等部分组成(图1)。图中井下

仪器、测井面板、滑轮和多笔模拟记录仪是现在使用的模拟测井设备,只在滑轮中增加了光电等距采样深度信号发生器。专用接口及电子计算机等均安装在数据处理中心,用来处理、解释数字磁带机记录的测井资料。

井下仪器测得的多路测井信息经电缆送至测井面板后,一方面送至多笔式模拟记录仪进行曲线记录,作现场监视及对比用,同时经控制面板送至交换子,在光电等距采样信号控制下,交换子对各路信号采样一次,即把多路的连续变化的模拟信号变为单路的脉冲幅度调制信号(PAM),然后将PAM送至对数编码器进行模数转换,得到对应于每路模拟电压的一组组数字码。经匹配器及控制面板将这些数字码送入磁带机进行记录。

测井获得的各种物性参数要与准确的钻孔深度联系起来。为此,Y₄₋₁仪将滑轮装置产生的光电和磁性两种深度信号经深度编码器进行深度编码,经控制面板,磁带机记录每帧测井数据的同时记录其对应的深度码。并通过解调解码,可由深度显示器实时显示出井下仪器在钻孔中的深度。解调解码还能将测井的数字信息码复原成模拟量,送给笔式记录仪进行记录,以便和原曲线进行对比。

测井中由于电缆提升速度的变化,光电信号的时间间隔不均匀。

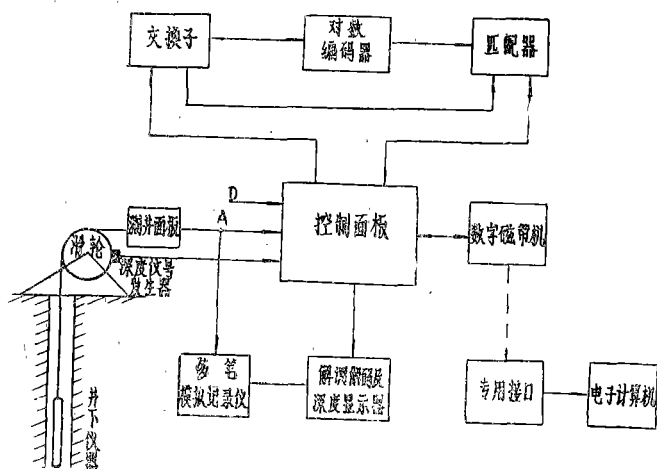


图1 Y₄₋₁仪工作原理图

普通的解决方法是在记录中增加缓冲寄存器,控制磁带机间歇运行,既保证磁带均匀记录又使磁带容量最大。考虑到野外的使用环境及目前国内元器件的生产水平,Y₄₋₁仪采用了磁带机连续运行的方式,使每帧内的记录间隔均匀,而帧与帧之间不均匀。这对数据处理不会产生什么影响,当然磁带的利用率是不高的。另一特点是A/D转换采用对数编码,且电路较简单可靠,提高了测量动态范围及相对精度,在野外试验中取得了较好效果。

2. 主要技术指标

测量路数(波道数): 16路。其中深度信号占两路,标准信号占一路,有效测量路数占13路,即可同时输入13路模拟信号或11路模拟信号加两路数字信号;

测量范围: 模拟输入 37 毫伏 ~ 6.4 伏(加前置放大器可 1 毫伏 ~ 6.4 伏), 数字输入为并行11位, 逻辑振幅 0 ~ 12伏。

测量精度: 大信号(> 50 毫伏)为 ± 0.5%, 小信号(≤ 50 毫伏)为 ± 5%;

工作方式: 连续或点测;

采样距离: 2.5厘米或 5 厘米;

采样频率: 400次/秒;

每路最高采样率: 25次/秒;

输入阻抗: > 500千欧;

被测信号内阻: < 1 千欧;

记录字长: 11位, 其中指数码 3 位, 尾数码 8 位;

供电: 220伏 ± 10%, 50周 ± 3 周;

耗电: < 300瓦;

实时监视能力: 可将记录的数字信息同时选四路进行模拟复原, 深度显示千米 ~ 分米, 最大 7990 米;

磁带机: YD 3—10;

磁道数: 16;

带宽: 1 吋;

记录密度: 8.5位/毫米;

带速: 记录时 4.75 厘米/秒, 回放时 76 厘米/秒;

声音道: 2 道;

记录方式: 数字道为不连续的饱和记录, 声音道为模拟线性记录;

带盘容量: 可供连续记录 3 小时以上。

二、主要部分的工作原理

1. 控制面板

控制面板的主要部分示于图 2。数字图头信号形成器由机械拨码开关组成。每一个拨码开关的十个状态被转换成四位 2 ~ 10 进制数码, 记录在图头内容部分, 其十个状态可人为地规定代表不同的图头内容。

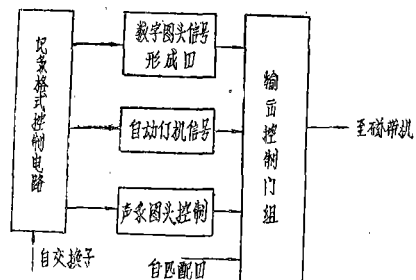


图2. 控制面板主要部分

自动停机信号是由电路产生的十一位全“1”码。当解调解码部分识别到全“1”码时自动停下磁带机。

记录格式控制电路控制声录图头结束, 使数字图头来自匹配器的测井数据及深度码及自动停机信号按预定格式通过输出控制门组送到磁带机的记录电路。

深度信号的处理部分包括对磁记号的检出之后的放大、整形、磁记号音响电路、强制磁性深度记号的检出等电路, 还包括对光电深度信号的放大、整形。强制磁性深度标记是在电缆上做好特定深度的磁记号的。该记号

一经检出就立即迫使深度编码器和显示器置为该深度值。还用步进电机取代了原笔式记录仪的自整角和自卷纸电机,以光电采样脉冲作深度信号,再配以合适的齿轮转动比,即可在1:20、1:200、1:500比例尺中任选一种进行记录及回放。

控制面板上还有2、4路数字量输入插座。

2. 交换子

其工作原理见图3。主交换子的功能是将来自控制面板的多路单端或双端输入门的模拟量变为单路的PAM信号送到编码器去。

由石英晶体振荡器产生的204.8千周/秒的方波经分频到25.6千周/秒在同步电路控制下与光电采样信号同步,以保证设备可靠工作。继续分频后产生400次/秒的路采样脉冲去触发五级双稳态电路。五级双稳译码后可以有32个状态,仪器实际选用了00000~10001十八个状态。矩阵译码后得到程序0~16,其中程序0使仪器处于准备状态,程序1~16分别控制十六个单端输入门,分别与PAM母线依次通断,且在某一时刻仅有一个输入门与PAM母线接通。程序11~15也可用来控制五个双端输入门。状态18的到来(即程序16的下降沿)结束了一帧采样,等下一个光电脉冲到来后重新循环。

付交换子通过光电脉冲使三级双稳态计数,由八路矩阵译码出8个状态,控制8个开关中的某些开关接标准电压 V_{ref} ,某些开关接地。通过电阻网络分压而产生25~800毫伏等八个标准电压送到16波道,供计算机处理时校准用。每隔8帧标准电压重复一次。

该部分还产生两种自检信号,一种是电阻分压得到的阶梯电压,另一种是超低频正

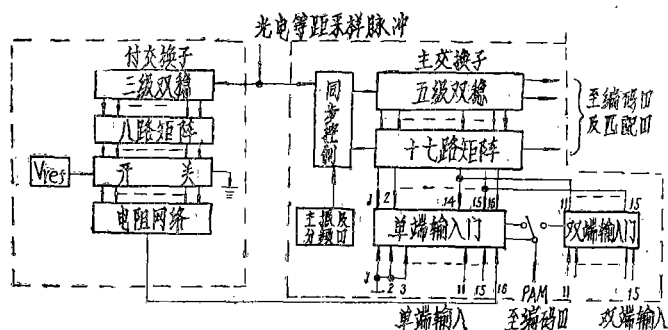


图3. 交换子工作原理图

弦信号。主交换子对它们采样,随时判断整机工作状态。

此外,交换子还向编码器、匹配器、控制面板等输出所需要的各种时间信号。

3. 匹配器

匹配器由帧、行同步形成电路、各波道取码脉冲形成电路、各输入控制门组以及深度编码器组成。除深度编码器外的其余部分如图4。

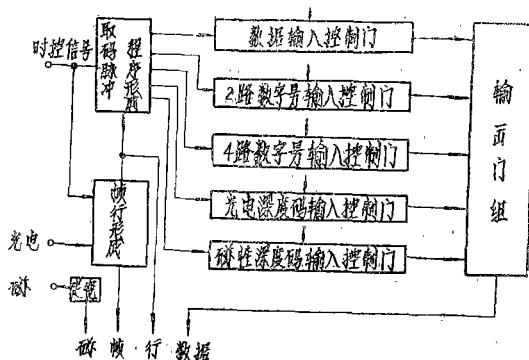


图4. 匹配器示意图

该部分主要起时间控制与匹配作用。将帧行同步、磁记号、各波道要记录的数字码按顺序送到控制面板。

由交换子来的时控信号产生行同步,各波道取码脉冲由交换子程序 $L_1 \sim L_4$ 在行同步作用下产生,去控制各种数码的输入门,依次将各波道输入数码均匀送到控制面板。

帧同步是光电信号产生的。光电和磁性深度信号除送到深度编码器外，磁记号还定宽送给控制面板。

深度编码器原理如图 5 所示。整个看来是由两个受控的可逆计数器组成。采用二—十进制码。

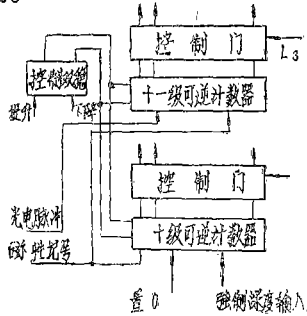


图5.深度编码器原理

磁性深度信号编码器由10级双稳组成。光电深度编码器由11级双稳组成。下放电缆时作加法，提升时则作减法。在 2.5 厘米采样间隔下，每来四个电光脉冲，计数器加或减 1 分米。待磁记号到来时，光电计数器被清“0”，同时磁计数器增加20米。加减控制在提升或下降过程中可以是自动的，也可以是手动的。

此外，该部分还包括各种控制开关，如连续测量/点测、2.5 厘米/5 厘米采样间隔交换、工作/自检等。

4.解调解码及

深度显示器

该部分主要由分路控制、尾数D/A转换、倍率复原及深度显示器组成（图 6）。主要作用是回放曲线以供现场监视与对比。这样可对测井资料作初步的分析解释

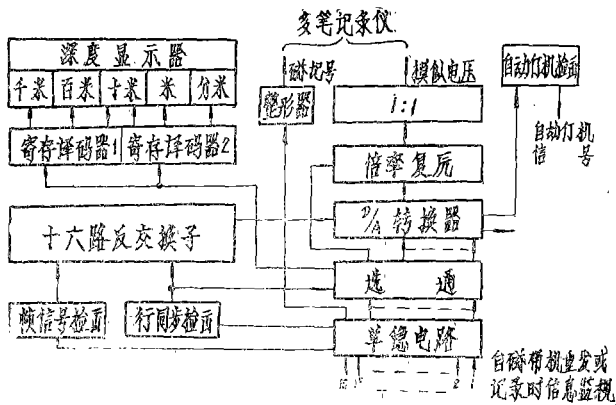


图 解调解码及深度显示器原理

用。

分路控制作用是检出回放或监视时来的帧行同步信号，把要复原解码的波道数所记录的数字码送入 D/A 转换器中，进行尾数变为模拟量的转换。

尾数 D/A 转换后，尚须进行指数码的变换，根据指数码的状态决定需缩小的倍数，即倍率复原。其原理见图 7。三位

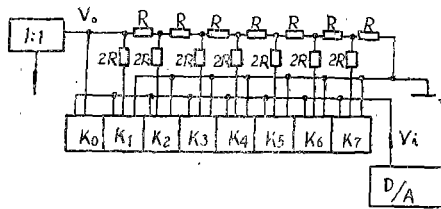


图7.倍率复原

指数码共代表了八种放大状态，由此来控制 K₀ 是接 V_i 还是断，以及 K₁ ~ K₇ 是接 V_i 还是接地。再经 1:1 电路送到记录仪。在指数码控制下，开关 K₀ 接通 V_i，那么 1:1 的输出电压必定是等于 1/2ⁿ V_i。十一位数字码到模拟信号的转换就是这样完成的。

此外，输送给 D/A 变换器的数字码还可供 SC16 光线示波器记录做精度检验用。

深度编码器的信息经解调解码由深度显示器实时显示测井的深度，也能显示回放测井资料的相应深度。

5.磁带机

该仪器磁带机互换性较好，野外现场记录和数据处理

理中心可以通用。因采用单缝磁头，读写不能同时进行。

磁带机主要由运带机构、读写电路、机能控制和电源等组成。运带机构采用了大包角（大于 270° ）的开环运带方式，在一定程度上提高了运带的稳定性。供、收带电机采用直流力矩马达，没有张力控制电路。快速倒带（2~3米/秒）时有自动拈带装置。回放时读电路采用了峰值检测电路，并通过调节单稳态宽度来消除各磁道之间的系统位移误差。机能控制电路控制首尾及每个参数段自动停机。此外还能遥控磁带机的一些工作状态。

6. 对数编码器

该部分可称为仪器的核心。对数编码有两个明显的优点，其一是扩大了测量的动态范围；其二是在整个测量动态范围内几乎能保证恒定的相对误差。这对小信号的测量很有意义。其原理如图8。可分为指数码转

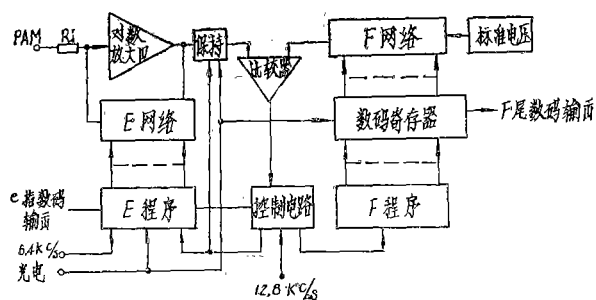


图8. 对数编码器原理框图

换和尾数转换两大部分。前者包括对数放大器、保持电路、E程序和E网络。后者包括F程序、F网络、标准电源和数码寄存器。图中的比较器是两部分共同使用的。在对数编码器中，对于PAM输入的每一路模拟电压 V_i ，首先控制将其放大 2^E 倍，其中E由三位二进制码组成，其值相当于十进制的0~7。然后将此电压 $V_0 = 2^E \cdot V_i$ 进行线

性编码A/D转换，变为8位二进制码。之后把这11位二进制码并行记录在磁带上，即完成了对 V_i 的对数编码记录。

从效果上看，该对数编码器相当于一个15位的A/D线性编码器。仪器标准电压为6.4伏，所以最高分辨力为0.2毫伏。加入合适的前置放大器，即可在保持一定相对误差的情况下进一步扩大仪器动态范围。

对数放大器是一个变增益的自动稳零运算放大器，以达到既压低零点漂移，又不损失频带的目的。

E网络是一个电流相加型反馈网络。通过E程序电路控制在任一时刻 $K_0 \sim K_7$ 八个开关中只有一个接 V_0 ，而其余七个全部接地，相当于使运算放大器的反馈回路接入不同的等效电阻，以得到8种不同的固定放大倍数。

尾数转换采用了闭环电压反馈逐位比较方式。由转换器内部8位D/A网络输出一个作为8位数字量函数的模拟电压，与输入的要转换的模拟电压进行比较，将比较的结果反馈到D/A网络，由8位数字量的最高位到最低位依次逐位比较来控制数码的增减取舍，如此循环使D/A网络的输出电压不断逼近被转换的模拟电压。到最低位比较完毕后，D/A网络输出电压与被比较的模拟电压之差一定小于D/A网络最低位所代表的模拟电压的一半。此时就用D/A网络的8位数字码代表被转换的输入模拟电压。

F程序由四级双稳计数译码电路组成。选用了计数器0101~1100八个状态。在控制电路输出的加减控制信号的作用下，使相应的数码寄存双稳置“1”或置“0”，分别用来驱动F网络8个开关接 V_{ref} 或接地。

F网络是一个D/A转换器。电路为一个普通的变形数电阻解码网络。当只有一个开

关 K_N 接 V_{ref} 时,其输出电压 $V_F = \frac{1}{2^N} V_{ref}$ 。

当多个开关接 V_{ref} 时其输出电压为线性迭加之和。用公式表示:

$$V_F = \frac{V_{ref}}{2^8} \sum_{i=0}^7 2^i K_i$$

式中若第 i 个开关接 V_{ref} ,则 $K_i = 1$,如接

地,则 $K_i = 0$ 。

比较器是个斯密特电路。当 $|V_0| < V_F$ 时 S_c 输出为高电平, $F_{18} = 0$ 。当 $|V_0| > V_F$ 时, S_c 输出低电平, $F_{18} = 1$ 。

Y_{4-1} 仪的对数编码是单极性的,仅能对正信号进行对数编码。对于负信号,在输入 Y_{4-1} 仪交换子前应作适当处理。

下面根据图9的逻辑图,结合图10主要

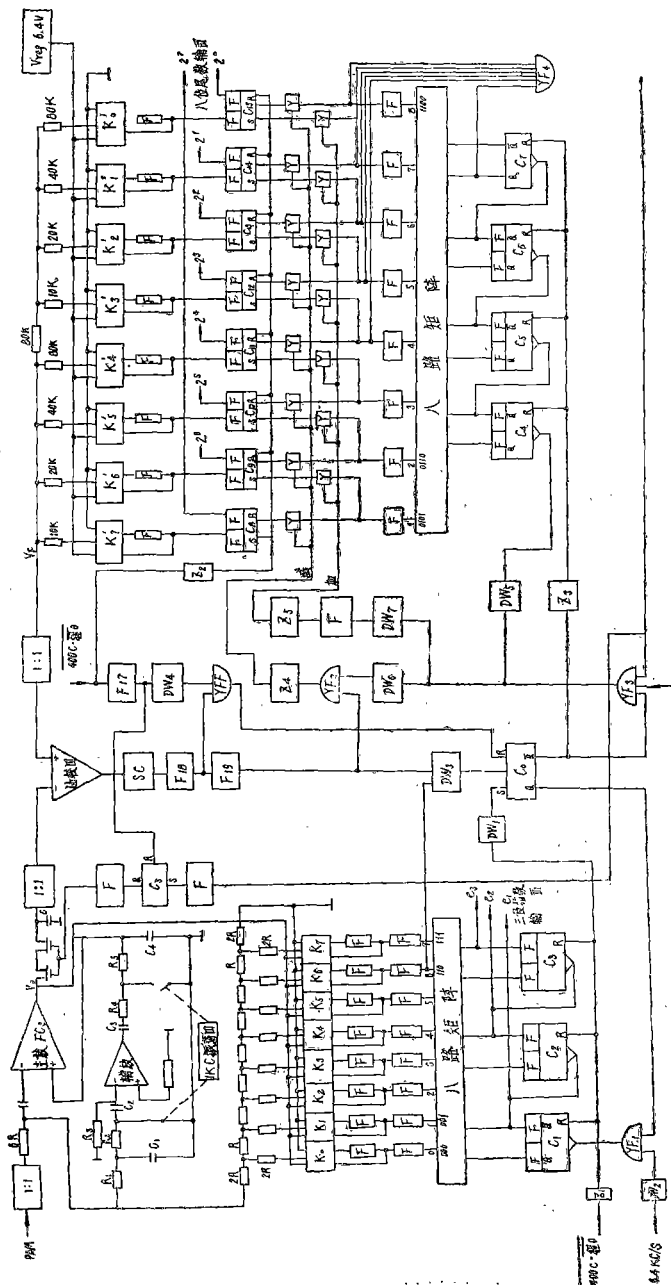


图9.对数编码器逻辑图

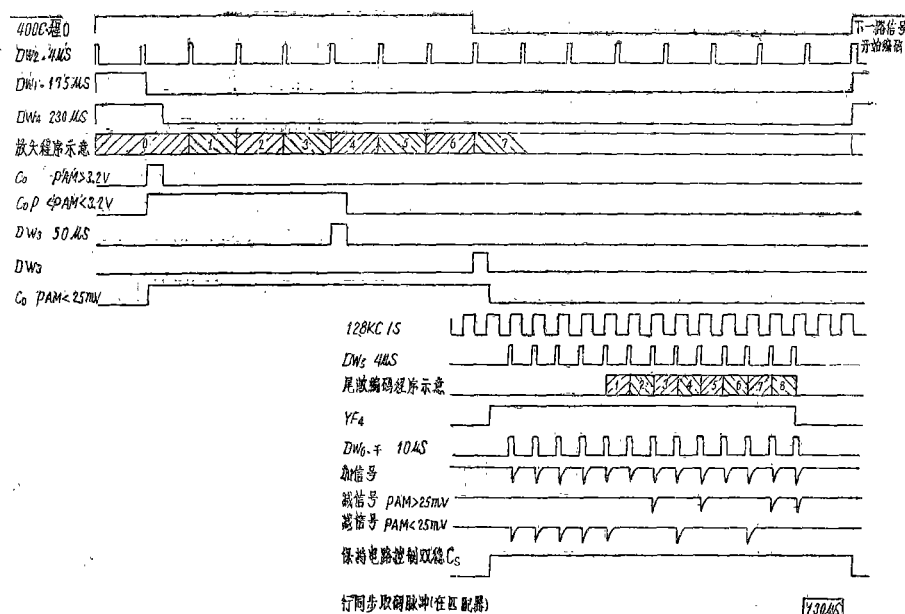


图10.对数编码器主要波形示意图

波形示意图,叙述一下对数编码器的系统工作情况。

图中所有双稳态都是下降沿触发的;所有的单稳态DW也都是下降沿触发,输出一定宽的正脉冲;图中的整形器Z输入的正跳沿,输出一窄的负脉冲;尾数转换部分接受加减信号的两组与门(共15个)都是负与门。

在光电等距采样脉冲信号控制下,交换子开始同步工作。交换子对输入模拟信号采样,经PAM送到对数编码器,同时送来了三种方波时控信号 6.4 千周/秒, 12.8 千周/秒及 $\overline{400 \cdot \text{程} 0}$ (以下简称400周/秒), 400 周/秒的上升沿经Z₁使双稳态C₁、C₂、C₃置0,即E程序处于0状态,使K₀接V₀。对数放大器对PAM进行1:1输出。与此同时,由Z₂将数码寄存双稳C₈~C₁₅置成10000000状态。K₇'接V_{r.e.f}, $V_F = \frac{1}{2} V_{r.e.f} = 3.2$ 伏输到比较器。同时经F₁₇使C₅置“0”,保持电路模拟开关导通, V₀很快对C充电并经

1:1输到比较器。F₁₇同时将D_{w4}触发, Z₁还触发双稳DW₁,使控制双稳C₀延迟175微秒后置“1”。此时F程序电路因YF₃被C₀的 $\bar{Q} = 0$ 封锁不能工作。根据PAM信号的大小,控制电路将作出三种反应。

①当PAM > 3.2V时,则 $|V_0| > V_F$, $F_{18} = 1$, C₀虽被置“1”,但在经DW₂输出的第1个可通过YF₁的6.4千周/秒脉冲到来之前, DW₄经230微秒后返回“0”态,使C₀翻转变“0”, YF₁被封锁, DW₂的输出不起作用, C₁、C₂、C₃的状态不变,指数码为000。

②当25毫伏 < PAM < 3.2 伏时, $|V_0| < V_F$, $F_{18} = 0$, DW₄输出被YFF封锁,这时6.4千周/秒经DW₂通过YF₁使E程序电路变为001状态,则K₀接地, K₁接V₀,对数放大器将PAM放大2'倍,只要经放大后的输出小于3.2V, E程序就进一步按2², 2³, ……2⁷规律对PAM进行放大,直到2^E·PAM > 3.2伏。然后C₀被

置“0”， YF_1 被封锁。在此输入范围内，指数码可能为001~111。当为001~110范围时，是通过在某一时刻 $|V_0| > V_F$ ， F_{18} 由“0”变“1”，再通过 F_{19} 触发 DW_3 ，使 C_0 置“0”。如果是111，则是通过E程序6的下降沿触发 DW_3 的。

③当 $PAM < 25$ 毫伏时，虽然放大 2^7 倍，也不会大于3.2伏，这时是利用E程序6的下降沿经 DW_3 、 C_0 来封锁 YF_1 的。值得一提的是此时E程序电路已经处于程序7状态，指数码为111， $F_{19} = 1$ 。

指数码转换从400次/秒正跳开始，至 C_0 翻转回零而完毕，之后E程序状态不再发生变化，三位指数码即代表了放大的倍数，处于等待输出到记录电路的状态。

C_0 一复位，即开始进行尾数编码。 C_0 复位在 $\bar{Q}$ 端产生正跳变，经 Z_3 使F程序双稳置“0”。 $\bar{Q}$ 也输至 YF_3 。F程序双稳置“0”引起 YF_4 正跳变1，也送至 YF_3 ，12.8千周/秒方波可通过 YF_3 ，使 DW_5 、 DW_6 、 DW_7 工作。 YF_4 的正跳经反相器使 C_8 置“1”，切断模拟开关，电容C将储存的电压 $2^E \cdot PAM$ 送至比较器，此时比较器的另一端输入电压 $V_F = \frac{1}{2} V_{r.e.f}$ ，根据输入信号大小可能产生两种情况：

①当 $PAM > 25$ 毫伏时， $|V_0| = 2^E \cdot PAM$ 必定大于 V_F ， $F_{19} = 0$ 。由逻辑图可看出，加信号随12.8千周/秒周期而来，不受其他控制，而减信号受 F_{19} 控制。因此在F程序1端出现“1”时， C_8 状态不变， C_9 置1。数码寄存器状态为11000000。此时 $V_F = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4}\right) V_{r.e.f} = \frac{3}{4} V_{r.e.f}$ 与 V_0 相比较，又有两种情况：若 $V_F > |V_0|$ 时， F_{19} 变1，之后在F程序已出现时 C_9 被减信

号置回“0”态，而同时 C_{10} 被加信号置

$$“1”，V_F = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{8}\right) V_{r.e.f} = \frac{5}{8} V_{r.e.f}$$

与 V_0 相比较。若 $V_F < |V_0|$ ，则F程序已出现时，减信号不出现， C_{10} 同样被加信号置

$$“1”，V_F = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8}\right) V_{r.e.f} =$$

$$\frac{7}{8} V_{r.e.f} \text{ 与 } V_0 \text{ 相比较。如每个F程序都重复}$$

以上过程，逐位根据比较结果进行置“1”，置“0”，加减取舍，直至F程序8出现时，对末位 C_{15} 决定保留“1”态还是置“0”态，尾数转换即结束，同时 YF_4 由“1”变“0”，封锁 YF_3 。

②当 $PAM < 25$ 毫伏时， $|V_0| < V_F$ ， $F_{19} = 1$ ，当F程序“1”出现时，减信号使 C_8 变“0”，加信号使 C_9 置“1”，

$$V_F = \frac{1}{4} V_{r.e.f} \text{ 与 } C_0 \text{ 比较，以下过程同①。}$$

尾数转换结束，数码寄存器的双稳状态即代表了 V_0 。

对数码编码器编码过程中指数码转换占用的时间与信号大小有关，尾数码转换占用的时间是固定的。在进行八位尾数编码时，已转换好的三位指数码处于等待状态。在匹配器的行同步取码脉冲作用下，11位数码并行输出，即完成了对一路信号的对数编码。接着可开始下一路模拟输入信号的编码过程。

三、 Y_{4-1} 仪的性能试验

本系统在初步完成系统配套、调试和组装后，1979年4月在一个含煤层水文孔中进行了实测，并取得了初步成果。后来又作了较长时间的野外试验。下面简要介绍试验情况。

(一) 试验目的

1. 在生产钻孔中实测天然伽玛、人工伽玛、视电阻率和井径四种参数, 并考察一次模拟记录、倍率复原监视记录与磁带机回放记录的一致性;

2. 完成野外资料的数字记录, 为计算机调试程序提供原始资料;

3. 考察整个数字测井系统工作的稳定性、可靠性、抗干扰能力、抗颠簸性、温度性能和对煤田测井井场电源等条件的适应能力。

(二) 试验内容

这次野外试验共进行了以下七项内容:

1. 天然伽玛、人工伽玛、视电阻率、井径、屏障电流、电阻率电位梯度和自然电位等七种参数的实测;

2. 天然伽玛、人工伽玛和电阻率的组合测量;

3. 放射性测井的测速对幅值的影响;

4. 不同源强 (Cs^{137} 和 Co^{60}) 的人工伽玛测量;

5. 两种抗干扰方法试验;

6. 温度性能试验;

7. 抗颠簸性能试验。

(三) 试验结果

1. 先后在五个生产孔进行了上述七种方法试验, 实测22条曲线。记录质量良好, 未发生漏记现象。

2. 七种方法的实测中, 除自然电位外, 其他六种方法的一次模拟记录、倍率复原监视记录与磁带机回放记录的一致性均良好。

3. 组合测量试验。 Y_{4-1} 仪一次可组合测量13种参数, 但目前由于双端输入门的实际应用问题未解决, 组合测井仅存在其他问题, 所以只实测成功天然伽玛与人工伽玛的

组合。

4. 对放射性测井进行了500米/小时、900米/小时、1500米/小时不同测速的试验。

关于测速对幅值的影响, 待计算机处理分析。

5. 抗干扰试验

试验过程中, 通过监视示波器可以看到高频信号干扰。初步分析干扰源来自电缆。这种干扰信号有时严重影响记录质量。为了克服这种干扰采取了两种方法: 一是提高信噪比, 二是在输入端并联旁路电容。

6. 自然电位的测量

由于自然电位信号往往低于系统的设计最低值(37毫伏), 因而反映出抖动大, 需要对负信号进行补偿后才能进行测量。

7. 温度性能

整个系统在 $+10^{\circ}C \sim +25^{\circ}C$ 范围内工作最稳定, 超过 $35^{\circ}C$ 时不能正常工作。

8. 抗颠簸性

经过往返1200公里公路颠簸和几百公里野外土路颠簸, 除个别插件松动外均能适应野外条件, 且能作到在井场开机后立即正常工作。

9. 电源波动适应性

在实测中均用10千瓦汽油发电机组供电。电压波动在 $\pm 10\%$, 频率波动 ± 2 周。在此条件下, 整个系统均能正常工作。

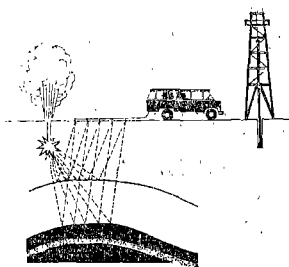
(四) 对 Y_{4-1} 仪的初步评价

1. 仪器总体设计合理。由于采用了先进的对数编码技术, 具有动态范围大、记录精度高的优点。

2. 允许多路参数输入, 能适应多参数组合测井。

3. 采用不带缓冲寄存器的磁记录系统, 使整个系统结构较简单, 磁带记录可靠。

4. 整机结构基本能适应野外工作要求。



高频地震若干问题的探讨

朱 诚 仁

(上海地质仪器厂)

中、深层地震勘探应用于油田取得显著的成效，已为世所公认。且引用到煤田勘探上也取得一定效果。但是直接将石油物探的中频地震用于解决煤田构造，特别是浅层或小断层构造等问题，尚存在诸多疑难问题不易解决。故近年来不少人提出应用高频地震方法去解决问题，某些人对中频地震仪器作了改进并进行了野外试验，取得若干成果。然而，何谓高频地震？它的方法特点和仪器技术指标有什么明确的概念呢？现在尚无统一的认识。本文提出一些探讨性看法，与诸位同行共同学习与研究。

一、高频地震的频率范围

顾名思义，高频地震与中频地震不同之处，首先在于两者频率上有高低之差异。那么高频地震的频率上、下界限是多少，这个频率范围又根据什么原则去确定？这是首先需要讨论的问题。这个问题不明确就无从着手设计高频地震仪。我们所说的频率范围具有两重意义：一个是指我们研究的对象—地震波的频谱；另一个是指高频地震仪的频带宽度。后者是依赖于前者的，只有明确了前者才能定下后者。两者不可混为一谈。

我们研究的地震波实际上就是一种弹性波。在介质中传播的弹性波，由于介质的不均匀性和各种其它因素的影响，它不是一个单色的振动波，而是许多振动波的合成。根据傅里叶基本概念，任意周期性波形，无论怎样复杂，都可以看成是正弦波的迭加，这些正弦波的频率为基波频率的整数倍。根据上述概念，地震波的频谱是什么呢？从以往的试验资料获得，利用常规爆破得到几种波的频谱如图 1 所示，由图可知，地震勘探主要研究的对象—反射、折射波的能量主要分布在频率为40~80赫的范围之内，这就是通常所说的中频地震研究范围。不言而喻，高频地震研究的频率范围应比中频为高，它的下限频率至少在80赫左右吧！那么上限频率是多少呢？在回答这个问题之前，让我们回过头来谈谈应用高频地震的目的，是为了提高分层的精度和寻找更小的构

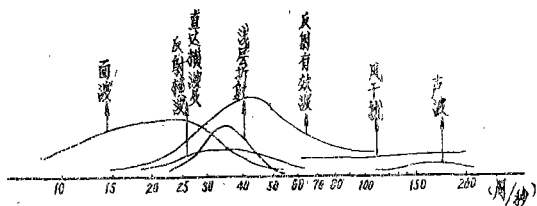


图 1 地震波的频率谱

不足之处：

1. 采样间隔（2.5厘米）对煤田测井来说过大。

2. 元件质量影响仪器稳定性和温度性能。

3. 整机体积、重量均嫌过大。