

自然 γ 能谱测井仪

方建国 沈天健 杨少琪 黄振光 谷 鸣

(中国科学院上海原子核研究所)

本文介绍在石油测井中利用碘化钠探头测量地层自然放射性物质U、Th和K含量的仪器。测量精度: U、Th测量误差不大于1.5ppm, K测量误差不大于0.5%。现正用于石油测井现场。

关键词: 测井 孔隙度 岩性 泥质含量 能窗 稳谱 解谱

一、序 言

早期的自然 γ 测井只记录0.1MeV以上总 γ 计数,不能区分放射性的种类,对复杂地层的鉴别就显得无能为力,对泥质含量的估算准确度不高。七十年代国外发展了自然 γ 能谱测井技术,它给出钾、铀、钍的含量,解决了更多的地质问题。

地层有机矿含量与该地层的U/K成正比,利用自然 γ 能谱就能研究生油层、估价盆地的生油能力。Th/U值能研究确定沉积环境。在寻找页岩储集层中发现,含有机物质的高放射性页岩中,油层具有U/K高的特点。在确定储集层的泥质含量方面,一般说来,地层泥质含量与K、Th含量密切相关,而与U的含量几乎无关。在油田开发中确定水淹层位和固井串槽,以及对老井的开发挖潜等方面,自然 γ 能谱测量都有它的独到之处。

自然 γ 能谱测井是根据自然 γ 的混合谱来确定K、U、Th的含量^[1]。在仪器设计中,可用多道获取及剥谱的方法确定各成分的含量,也可以根据K、U、Th放射性物质相互影响小的有关分支设置多能窗获取,记录各能窗的计数率,参照已知含量的模型井各元素响应系数的刻度值求解矩阵的方法来确定各元素的含量。

二、仪器的构成

测井仪包括一部仪器车、一部电缆车和两支相同的井下仪器筒。仪器车内主要安装地面仪器部分,其中的标准仪器柜由几个活动插入的标准仪器箱体组成,它是以微计算机为中心的数据获取与处理系统。仪器车中的光电记录仪用作测井过程中测量曲线的实时记录,对自然 γ 能谱测井而言是记录 $\Sigma\gamma$ 、K、U、Th四条曲线和井深标记。磁带机记录各井深处的原始测量数据,为离线处理和交会处理提供原始资料。

测井仪器的地面部分包括磁带机、磁带机格式控制器、深度编码器及接口、数据获取解码单元及接口、稳谱高压控制单元及接口、微计算机及扩展部件、打印机、井下电源控制及指示、接线及供电和防震气垫。

计算机为国产的以Z80为中央处理器的微机。现使用其中四路DA作为模拟量输出,其余四路DA作为扩充备用,打印机作为人机对话的工具及测量数据实时输出的记录工具。对微机增设了一组总线驱动器,除微机本身占用的外设号外,还提供了64个外设号供进一步外扩充。

数据获取解码单元及接口的主要功能是把井下发送上来的序列编码脉冲解码成四位并行的数据存入缓冲存贮器,当缓冲存贮器满了的时候向计算机发出中断请求,经其接口将缓冲

存贮器中的内容送到计算机(见图1)。

解码电路分成两部分, 一是由有共模抑制的微分放大器、限幅器、放大器、成形器所组成的处理电路; 另一个是由缓冲存贮器、计算机总线上的接口电路、显示单元等组成的数字电路。前者对由电缆送来的信息进行处理, 抑制工频的共模干扰和低频干扰, 提高信噪比, 解码产生数字脉冲; 后者把串行数据变换成并行数据存入缓冲存贮器并与计算机通讯。

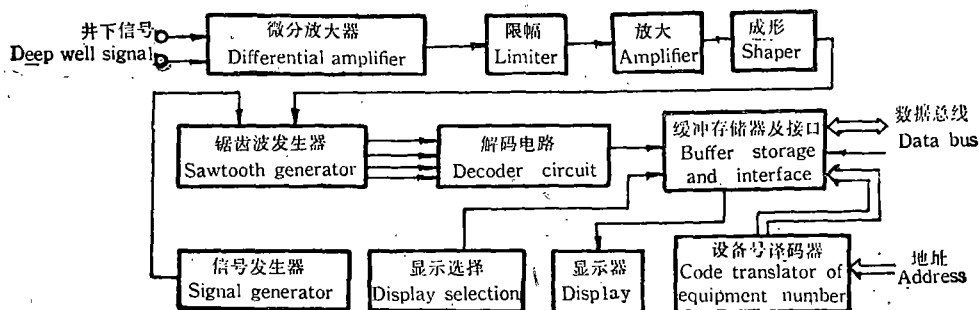


图1 解码单元方框图

Fig. 1 Block diagram of the decipher unit

数据获取解码单元具有中断控制能力, 可由微机来开关中断。它还可以选择读出不同窗口的计数率, 这样有利于操作员在测量过程中检查监督各窗口的计数情况。为了诊断数据获取解码单元的硬件故障, 本单元内设有一个模拟井下编码信号的发生器, 该信号是由计算机计算出的伪随机序列, 微机软件可以检查这个解码单元的数据, 并打印出诊断结果。

稳谱高压控制单元及接口是为了对井下仪器进行闭环控制, 其原理见图2。

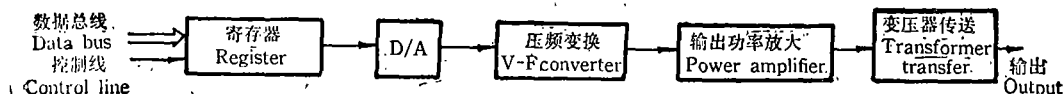


图2 稳谱高压控制框图

Fig. 2 Control of a spectrum stabilizer for high-voltage

这里采用控制井下光电倍增管高压的办法来稳定待测脉冲在不同温度下的幅度, 通过一组调频信号去控制井下高压, 当井下温度升高时, 要求高压增高去稳定脉冲幅度。在地面用增加频率的办法达到井下高压增高的目的。这里采用的是12位的数模变换器, 它使高压的调节具有相当的精度。

为了对井下高压有所了解, 设置了一组高压显示器。通过开关, 操作员可以随时了解当前高压(实际上也可以随时了解当前井下仪器所具有的环境温度)或预置高压。还设置了一个指示灯, 显示软件是否完成了对稳谱峰的搜索而进入稳谱状态, 也显示仪器是否在稳谱的条件下工作。

井深度编码器及接口是为了获得较精确的井深值而设置的。在测井过程中, 井的深度值是一个重要的参考值, 电路采取了对井深的一些校正方法, 它每隔一预定的深度向计算机发出中断, 计算机优先地读取这一数值并相应地输出当前的U、K、Th值。

为了对数据作测后离线的进一步细致的处理, 本机采用了九轨磁带机对现场原始数据作

存贮记录, 磁带机采用PE记录方式, 记录密度为630位/cm, 速度为63.5cm/s。格式器采用微程序控制方式, 微程序通过微程序系列控制器来执行。格式控制器与计算机之间采用查询的通讯方式, 数据交换用存贮器映射的方式, 这种数据交换很少占用微机时间。微程序允许作四层子程序嵌套, 指令有转移、条件转移子程序、子程序返回、栈操作、PC+1、接受外部条件的RST多重分枝指令等。为了节省硬件采用了页面地址方式。目前用了四个页面, 共800余条指令。由微程序系列控制器给出适当的地址, 通过ROM找出执行的微指令, 经控制译码器去控制各部件的协调工作。读写数据变换器将RAM送来的计算机数据转换成适应磁带机的脉冲, 磁带机读出的数据经过PE读板进入RAM。PE读板把读出脉冲整形、锁相并还原成数据, 剔除前后同步, 给出读数误差。

井下仪器安装在一个能承受 $7.8 \times 10^7 \text{Pa}$ 压力的防震性能好的仪器筒内, 结构见图3。它包括探测器、前置放大器、主放大器、阈放大器、多个单道分析器、分频器、编码器、功率放大器、稳谱控制器和高压发生器。

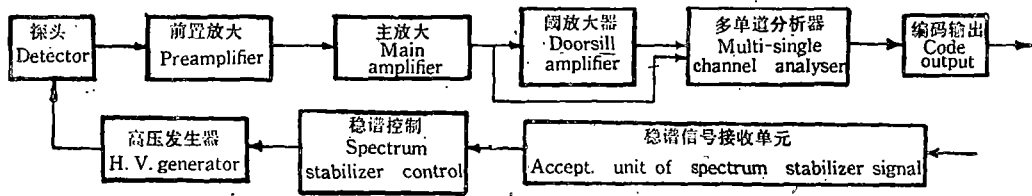


图3 井下仪器框图

Fig. 3 Block diagram of the deep-well equipment

三、仪器性能和特点

1. 探测器的选用 K、U、Th在地层中含量不一, 而且含量较低。在对各种探测器作了比较后, 本仪器采用了大尺寸的碘化钠晶体。它的大小为 $\phi 50 \times 300 \text{mm}$, 分辨率约为12%。尽管它的探测效率较高, 但由于地层中自然放射性物质含量低, 测量的统计涨落大, 所以测速仍受到限制。

2. 稳谱源的选择 闪烁探测器与其联用的光电倍增管受温度影响大, 而井深在3500m左右的地层, 环境温度高达 120°C 以上。所以在测井中稳谱是一个难题。与岩性密度测井一样, 采用了稳谱源的方法。对稳谱源作过多次实验选择, 最后选用了 ^{241}Am 源的59keV的光电峰作为稳谱峰, 而欲测的K、U、Th的光电峰是几百keV到几个MeV, 要用59keV峰去稳定它们是相当困难的。在本仪器中使用了一个极为稳定的阈放大器, 把59keV的峰等效地放大到几百keV左右, 即相当于用一个几百keV左右的峰去作稳谱峰。实践证明, 效果良好。

3. 编码传送、微机管理 为了避免模拟量传送的失真与易受干扰等缺点, 本仪器采用数字编码传送方式, 将欲测的 γ 射线分成五个能窗在井下分类获取, 而后以一定的周期编成数字码串行向地面传送, 由地面的解码电路解码后送入微计算机进行获取与处理, 由磁带机等记录。稳谱窗的信息经计算机分析后用调频的方式将控制信息送至对井下高压进行控制。井下有高频控制信息的解调电路, 解调后去控制高压, 形成闭环。

4. 设有多个监视手段和多种诊断能力 为了便于监护, 仪器在地面操作台上设有当前高压情况的指示、是否处在稳谱条件下工作的指示, 并能随时观察各窗口计数率的情况以供操作人员判断或作人工干预。为了维修方便, 也能将仪器分成多段检测, 对每段硬件分别诊断。

大大缩短了使用过程中排除故障的时间。

5. 有较好的软件系统 管理软件和处理软件均采用汇编语言。保证了获取、稳谱及处理等任务的实时性和多参量并行工作。根据放射性测量的特点,采用了合适的数字滤波方案,选用了适当的控制周期,从而获得最佳控制并测出曲线的平滑性。

6. 元器件基本国产化 除了计算机及接口电路片芯外,特别是井下仪器基本上采用国内厂家生产的元器件。经过高温老化指标筛选,现在仪器能在3500m左右的井深工作。

四、能谱数据的实时处理

本仪器除了由磁带作原始数据记录外,特别提供了实时处理,及时给出了各测量层的U、K、Th的含量。在实时处理中根据图4的能谱曲线,选用下列五个能区对三种放射性进行能谱强度分析:

(1) 复合能区I; (2) 复合能区II; (3) 钾特征能区III; (4) 铀特征能区IV; (5) 钍特征能区V。

按以上五个能区窗口对自然 γ 进行获取,每个能区窗口的获取计数率分别为 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 ; K、U、Th分别表示各元素的含量,则可列出方程组:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}K + a_{12}U + a_{13}Th &= N_1 \\ a_{21}K + a_{22}U + a_{23}Th &= N_2 \\ a_{31}K + a_{32}U + a_{33}Th &= N_3 \\ a_{41}K + a_{42}U + a_{43}Th &= N_4 \\ a_{51}K + a_{52}U + a_{53}Th &= N_5 \end{aligned} \right\} (1)$$

如果用矩阵形式来表示方程组的系数,则有:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} \end{pmatrix} \quad (2)$$

用 X 表示由K、U、Th组成的列矩阵,

N 表示由相应窗口计数率组成的列

矩阵,则(1)式的方程组可表示成:

$$AX = N \quad (3)$$

上面的方程组由于方程的个数多于未知数的个数,所以不可能是唯一解,但可以采用最小二乘法求最佳值。加权最小二乘法对方程组(1)可改写成:

$$\sum_{j=1}^3 a_{ij}X_j = N_i \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (4)$$

实际上由于受统计涨落和测量误差的影响,方程组的左右两边不可能完全相等,必须考虑各道的残差:

$$\Delta_i = N_i - \sum_{j=1}^3 a_{ij}X_j \quad (5)$$

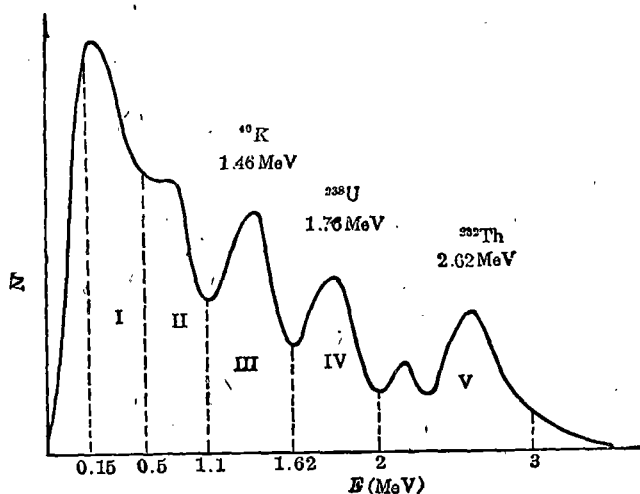


图4 自然 γ 能谱曲线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a natural γ spectrum

根据最小二乘法原理,要求各道的残差平方和为最小,且考虑到各道的统计涨落不一样,引入权因子 W_i ,故可得到:

$$R = \sum_{i=1}^5 W_i (N_i - \sum_{j=1}^3 a_{ij} X_j)^2 \quad (6)$$

为了使 R 最小,则要求满足下式极值条件:

$$\frac{\partial R}{\partial X_k} = \frac{\partial}{\partial X_k} \sum_{i=1}^5 W_i (N_i - \sum_{j=1}^3 a_{ij} X_j)^2 = 0 \quad (k=1,2,3) \quad (7)$$

由此可得:

$$\sum_{j=1}^3 (\sum_{i=1}^5 W_i a_{ij} a_{ik}) X_j = \sum_{i=1}^5 W_i a_{ik} N_i \quad (8)$$

于是可以写成:

$$\begin{aligned} A^T W A X &= A^T W N \\ X &= (A^T W A)^{-1} A^T W N \end{aligned} \quad (9)$$

式中, W 为权因子 W_i 组成的对角矩阵,因为一个测量值的权因子反比于该测量值的方差,而计数的方差约等于计数率,则 W_i 可以选取为:

$$\begin{aligned} W_i &= 1/N_i \\ W &= \begin{pmatrix} 1/N_1 & & & & \\ & 1/N_2 & & & \\ & & 1/N_3 & & \\ & & & 1/N_4 & \\ & & & & 1/N_5 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

矩阵 A 称为混合谱的响应系数矩阵,它可以通过在已知浓度的标准井中刻度确定。 A^T 是 A 的转置矩阵。通过(9)式,就可以求出K、U、Th的含量。

最小二乘法解谱可以得到比逆矩阵法和剥谱法更高的精度。对重迭峰和弱成分的分析也较好,解谱效果的优劣还可以得到相当可靠的检验,但它对标准谱和样品谱的测量条件要求严格一致,增益和阈漂移的稳定度要求高,即对稳谱有更严格的要求。

五、仪器的基本指标和使用的地质效果

仪器达到的基本指标:测量速度:200m/h。测量范围:U为0.5—20ppm;K为0.1—10%;Th为0.5—20ppm。测量精度:U测量绝对误差不大于1.5ppm;Th测量绝对误差不大于1.5ppm;K测量绝对误差不大于0.5%。机械性能:下井 $\phi=102\text{mm}$ 、长2.8m、重56kg;耐压78.45MPa。温度性能:井下仪器能适应3500m左右井深的测量。

通过多次的现场测井,试验了多种确定K、U、Th含量的方法,对照已知的地质情况,证明了自然 γ 能谱测井方法的可行性和它的地质效果。

现场测井中所获得的自然 γ 能谱测井曲线在不同岩性的钻井剖面均有较明显的反应特征。在某油井的测井中,渗透性粉沙岩地层的总自然 γ 曲线幅度与泥沙层一致,但钍、钾含量低,而铀含量明显增高。正是由于渗透层中放射性元素的富集引起了这一现象的产生。这一事实表明自然 γ 能谱测井弥补了单纯自然 γ 测井的不足。在防止渗透层油层的误判方面起着很好的作用。

江汉油田潭15井, 井剖面岩性较复杂, 有沙岩、泥岩、白云岩和灰岩, 还出现了煤层。在泥沙岩中, 有的含石膏且含量不等, 有的泥岩含碳质比较多。在这些不同的层段自然 γ 能谱测井的四条曲线均有反应, 差别比较明显, 泥岩含碳质多, 铀、钍明显增高; 含石膏成分多, 铀、钍、钾含量则减少。而碳酸盐地层的铀、钍、钾含量为最低, 煤层则显示出高放射性物质异常, 铀、钾含量比一般沉积岩高得多而钍的含量极少。

在台二井大段碳酸盐地层, 含量曲线随地层泥质含量的增高有着明显的增加趋势。现场测井表明在厚的或薄的砂泥岩交互层, 测井曲线都有相应的反应。

六、结 束 语

在测井过程中发现由于地层中自然 γ 含量低, 仪器的测井精度与所要求的仪器测井速度矛盾相当大, 所以对每个井的重点层段必需采取定点测量或放慢测井速度来获得较好的精度。

参加本仪器研制工作的还有屠建型、吴幼阳、蒋建国、明秀芹、张士章、秦忠芳等同志。测井方法、标定及现场测井工作主要以江汉测井所杨明、何清源、田作玺、艾强等同志为主进行。

参 考 文 献

- [1] C. E. 克劳塞梅尔, 应用 γ 射线能谱学, 原子能出版社, 1977年。

A natural gamma-ray spectrometer for well logging

Fang Jianguo Shen Tianjian Yang Shaoqi Huang Zhenguang Gu Ming
(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

Abstract

In this paper an instrument system designed for measuring natural γ -energy spectrum (U, Th, K) is described. The accuracy for measuring uranium and thorium is better than 1.5 ppm, and for measuring potassium is better than 0.5%.

Keywords: well logging porosity lithologic character shale content
energy window spectrum stabilization spectrum unscrambling