

电磁波测井的实验技术及结果分析

康国军¹, 赵淑芬², 房德斌¹

(1. 吉林大学 地球探测与信息技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 为了对多频电磁波测井有更深入的了解, 结合实验研究工作, 针对油田的地质情况, 研制了模拟实际测井环境的油水层模型, 归纳出一套较为系统的实验方法和测量技术, 并对测量结果进行了分析和讨论, 取得了较好的实验效果。

关键词: 电磁波测井, 物理模拟, 实验曲线

中图分类号: P631.3; P631.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2003)01-0043-03

介电常数 ϵ_γ 和 高频电阻率 ρ 在石油勘探中具有重要意义^[1], 国内外都很重视这一课题的研究。这 2 个电磁参数通过探地雷达、电磁波测井和钻孔电磁波法等地球物理方法已经被广泛地应用于石油勘探以及水文、工程和固体矿产的勘探之中^[2]。对于高频电磁波参数的数学模拟, 国内外专家已经做了大量工作, 但是由于问题的复杂性, 所研究的内容都只限于正演计算和资料解释, 很少有人涉及参数的反演计算, 至于接近实际测井环境的物理模拟, 特别是多频电磁波的物理模拟基本没有什么结果公开发表。

为进一步了解多频电磁波测井, 我们研制了模拟油层、水层、低侵、高侵和油水共存的可拆卸的人造材料地层模型, 为高频段物理模拟探索出了一套实验测量技术, 并对实验结果进行了整理分析, 得到了一些在应用中具指导意义的规律性东西^③。

1 地层模型

1.1 模型制作及参数

通常情况下, 油层电阻率 ρ 较高(几十 ~ 几千 $\Omega \cdot m$) 相对介电常数 ϵ_γ 较低(2 ~ 4), 而水层的 ρ 则相对较低(几 ~ 几十 $\Omega \cdot m$), ϵ_γ 却较高(几十)。根据油水层的这一特点, 考虑到物理模拟的模型参数与实际情况相近才使得实验的结果具有可比性, 我们选用特制的加气混凝土块作为地层的骨架模块。这种材料的模

块具有电阻率高、孔隙度大、吸湿性强、便于加工等优点。

为满足不同地层所含不同液体其电性参数也不同的这一基本条件, 通过对模块的处理, 测得其相应参数为 ①干岩样: $\rho = 3\ 000 \Omega \cdot m$, $\epsilon_\gamma = 3.3$, 测试频率 10 MHz; ②在 1 000 kg/L 的 NaCl 盐水中浸泡 48 h 的岩样: $\rho = 107 \Omega \cdot m$, $\epsilon_\gamma = 2.1$, 测试频率 5 MHz; ③在自来水中浸泡 48 h 的岩样: $\rho = 2\ 500 \Omega \cdot m$, $\epsilon_\gamma = 16$, 测试频率 5 MHz; ④在煤油中浸泡 48 h 的岩样: $\rho = 2\ 650 \Omega \cdot m$, $\epsilon_\gamma = 4$, 测试频率 5 MHz。

根据测得的数据, 利用高矿化度盐水浸泡的模块作为水层模块, 与实际水层的 ρ , ϵ_γ 2 个参数是相近的。同样, 干岩样模块作为油层模块也是可行的。

1.2 地层的种类及规格

地层的制作既要考虑仪器探测的影响范围要求, 使模块有一定的延伸半径, 又要考虑到改变地层时的方便等因素, 因此, 将其堆砌成不同规格的墙体(相当于将垂直的井轴转 90°, 变井轴为水平), 再在中心挖一直径为 15 cm 的圆孔作为井眼, 这样, 可按油层、水层、矿化度、饱和度等不同要求, 既满足了实验方案的实施, 又易于调整所要求的各种地层环境。

模拟实际情况制作了如下几组地层供实验用: ①单水层; ②高侵入单水层, 侵入半径为 0.3 m, 侵入带为油层介质, 模型制作是在纯水层基础上, 在井

③ 佟文琪, 康国军, 房德斌, 等. 多频电磁波测井资料反演方法和井壁成像技术研究 [J]. 吉林大学物探系, 2000.

收稿日期: 2002-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目部分成果(4967423)

眼四周 0.6 m 范围内加上油层模块 ;③单油层 ;④低侵入单油层 ,侵入半径为 0.3 m ,侵入带为水层 ,模型制作是在油层基础上 ,在井眼四周加入水层模块 ;⑤油、水双层 ,将单水层和单油层置于同一水池内 ,二者相距 0.6 m。以上几种地层模型直径均为 1.8 m ,层厚 0.6 m。

1.3 实验环境及模块设置

采用长 4.06 m、宽 2.35 m、深 2.5 m 的大水池作为放置模块的容器 ,水池内充满盐水或淡水作为地层模块的围岩和井眼内的介质。地层模型放置在水池中央的轴心线上。

2 实验装置及测量技术

本装置主要由水槽、地层模块、多频电磁波测井系统及相应的辅助设备所组成。选用圆柱状环形线圈作为发射和接收天线 ,采用单发双收工作方式。为了模拟不同电性参数的地层及侵入带的状况 ,对地层骨架模块充以不同的导电溶液(干岩样、不同矿化度的饱和水及油) ,然后对模块进行防水密封处理。为了便于工作 ,测量时将天线放入水池中 ,其他测量部分置于地面 ,拉动天线系统自测线的一端向另一端逐点移动进行自动记录测量。

数据采集电路分为幅度测量电路与相位差测量电路 ,记录方式为由单片机构成的数字记录和模拟记录 ,仪器的整个工作过程由单片机来控制。

幅度测量电路由 2 组完全相同的电路组成 ,用以分别测量天线 R_1 和 R_2 所接收到的电磁波的波幅变化信号(图 1a)。首先 ,对由接收机检波器送来的幅度信号 V_i 进行电压放大 ,再送入电压频率转换器 (V/F) 转换成频率信号 f_0 ,这个转换过程实质上就是对 V_i 的数字化过程 ,经过 V/F 电路后 V_i 与 f_0 成正比关系 ,用单片机记录下的 f_0 反映了幅度值的变化情况。利用 V/F 电路对模拟信号进行数字化 ,具有转换精度高、电路抗干扰能力强的优点。

相位差测量电路如图 1b 所示。由中频放大器 A、B 送来的 2 路 100 KHz 的中频信号 ,经过放大电路放大以后 ,与频率为 101 KHz 的本振信号进行混频后进入选频放大器 ,选频放大器输出 1 KHz 的鉴相脉冲 ,两路鉴相脉冲送入由与门组成的鉴相开关 C ,鉴相开关 C 的输出脉冲宽度 T 与 A、B 两路之间的相位差相关。由鉴相器输出的脉冲信号 ,最后送入单片机的计数端来计算脉冲宽度 T ,通过这个 T 值就可以计算出 A、B (即 R_1 、 R_2) 的相位差。

测量的采样间隔可任意选取。本实验的采样间隔

分别为 0.5 cm 和 1.25 cm ,每个测点测 4 个点频(10、30、50、70 MHz) ,每个点频所测的参数是 R_1 处的磁场幅值 H_1 、相位 φ_1 , R_2 处的 H_2 、 φ_2 以及 H_1/H_2 和 R_1 与 R_2 的相位差 $\Delta\Phi$ 。

3 测量结果分析

3.1 均匀场

在实验水槽中分别充满 NaCl 浓度为 1000 mg/L 的盐水或淡水(自来水) 2 种溶液可作为测量的均匀场的介质 ,并起到围岩和井内流体的作用。然后依次将地层模块放入水池中 ,构成了各种不同的测量模型。

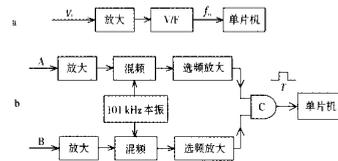


图 1 数据采集电路测量原理

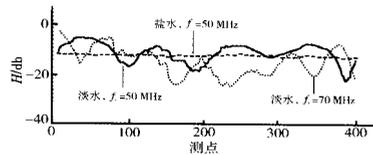


图 2 均匀场测量结果

图 2 为不同工作频率时 2 种溶液均匀场的测量结果 f_i 为测量频率。由实测曲线可见 ,淡水均匀场 H 由于池壁反射波的干扰使得曲线起伏波动 ,表现出明显的干涉现象 ,而咸水均匀场 H 由于对电磁波的衰减增大 ,池壁反射影响减弱 ,而使测得的曲线比较平稳 ,同时 ,也说明在有限的水池内做实验时 ,为减小池壁的反射波对测量结果的影响 ,采用增加水的含盐浓度 ,是一种可行的方法。图 2 还说明当改变测量频率时 ,随着频率的增高 ,波长变短 ,干涉周期缩短 ,而使曲线起伏变化更为明显。

3.2 单水层曲线

当水池充满盐水时 ,水层模型的电阻率为 $107 \Omega \cdot m$,而围岩为盐水的电阻率仅为 $3.4 \Omega \cdot m$,二者相差 30 多倍 ,水层的介电常数为 21 ,而围岩的介电常数为 80 左右 ,二者相差约 4 倍 ,因此地层属于高电阻低介电常数。由于吸收系数 β 随介质电阻率 ρ 的增加而呈明显下降趋势 ,而 β 与场强幅值又是负指数关系^[3] ,因此随着 β 的减小 ,场强增加 ,在 H_1 、 H_2 曲线上对应地层呈明显正异常 ,异常半幅值点大致对应地层界面。曲线如图 3 所示。

而相位差 $\Delta\Phi$ 曲线主要反映 ϵ_r 的影响 ,由于水层

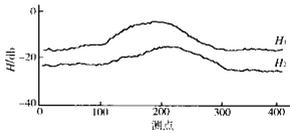


图3 地层异常曲线

的介电常数比围岩低,相位常数 α 随 ϵ_y 的增加而增大,使得对应水层处的 $\Delta\Phi$ 曲线出现负异常。对于高侵入水层,由于侵入带 ρ 的增高(2 650 $\Omega \cdot m$),介电常数 $\epsilon_y = 4$,所以曲线的基本形态与无侵入时基本相似,但异常幅度有所变化。

3.3 单油层曲线分析

油层相对于围岩,属于高阻低介电常数介质($\rho = 2\ 650\ \Omega \cdot m$, $\epsilon = 4$),因此在油层的 H_1 、 H_2 均属于正的异常。

3.4 油、水、双层的曲线分析

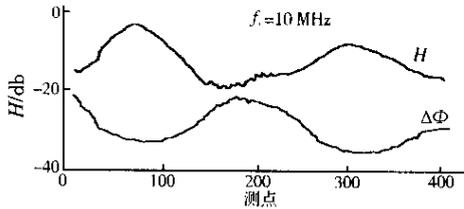


图4 场强和相位差与地层的关系

相对围岩为咸水的油层和水层均属高阻低介电常数的异常体,场强幅度均为正异常,相位差曲线则为负异常,而且正异常的 H 与负异常的 $\Delta\Phi$ 和地层三者间的对应关系很好(图4)。

4 几点认识

结合本次物理模拟实验,可归纳出以下几点:

(1)物理模拟是多频电磁波测井正反演研究的基础性工作,并为二者紧密结合、互相印证、从中寻找新问题、发现新规律奠定基础。

(2)利用本实验的模型和测量系统所得到的曲线对应地层有明显的异常显示,异常半幅值点对应层面位置。

(3)用增加池中水矿化度的方法可以有效地压制池壁反射波的干扰。

(4)这套较系统的物理模拟实验方法对进一步推动电磁波测井技术的发展将是有益的。

向本项研究的主要参加者和本文的导师者佟文琪教授致谢。

参考文献:

- [1] 达耶夫 马 C. 高频电磁波测井方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1981.
- [2] 电磁波法研究组. 钻孔电磁波法[M]. 北京:地质出版社, 1972.
- [3] D 郑钧. 电磁场与波[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1984.

EXPERIMENTAL TECHNIQUE AND RESULT ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC LOGGING

KANG Guo-jun¹, ZHAO Shu-fen², FANG De-bin¹

(1. College of Geoporation and Information Technology, Jilin university, Changchun 130026, China; 2. College of Computer Science and Technology, Jilin university, Changchun 130026, China)

Abstract: Physical model experiment is a basic study in electromagnetic log response and its forward and inversion calculation. In combination with experimental studies, this paper presents the research on electromagnetic logging in an oil and water layer model which is identical in geological condition with the multi-frequency electromagnetic logging. In addition, a set of experimental methods and measuring techniques are summed up. This paper also makes an analysis and discussion on the curve measured from the experiment. The result of the experiment is fairly good.

Key words: electromagnetic logging; physical model; experimental curve

作者简介:康国军(1949-),男,内蒙通辽市人,硕士,副教授。一直从事电磁波方法理论研究,已发表文章近20篇。