

基于瞬变电磁理论探伤仪的接收系统研究

瞬变电磁法作为一种地球物理的探测方法，在时间空间上具有可分性，方法简单，信息量丰富准确度高，其测井方法对于提高中后期油田剩余油的采收率有着十分重要的意义。主要研究了瞬变电磁探伤仪的理论依据与接收系统，通过对建立模拟模型的运算与推导，然后经过理论推导证实了瞬变电测法测井的可行性。仪器探头探测到套管的缩径、穿孔、腐蚀和破裂等现象，发射出极微弱的信号给井下接收系统，接收系统接收到综合度很高的信号，需要对其研究分离技术和有效起始时间的确定。并在此基础上考虑提高接收系统瞬变电磁法的测试准确度。

王浩 党博 宋楠 李志强/西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室 樊维/陕西省地方电力集团有限公司眉县供电分公司



王浩/硕士研究生

关键词/Keywords

瞬变电磁法·
测井·
接收系统·
测试准确度·

瞬变电磁探伤仪是以电磁理论为基础，建立了瞬变电磁法井下介质模拟模型，设计采用正交探头的方法实现对套管的全方位检测。以麦克斯韦方程组以及傅里叶变换为出发点，分析套管中的电磁响应，推导出感应电动势的方程以此来验证此方法的可行性。在基本可行的基础上，设计了一套完整的井下电路，其中的接收系统来采集由探头发射的微弱电磁场信号，通过放大滤波、衰减、AD-DA和编码发送至井上上位机，上位机得到井下电动势信号来解决此类问题。

瞬变电磁法测井的理论介绍及建模

1. 瞬变电磁套损检测理论

套管电磁检测技术以瞬变电磁法为理论基础，检测原理为法拉第电磁感应

定律。检测系统由发射装置和接收装置组成，工作过程依次为发射、电磁感应和接收三部分。检测时将探头放置于套管中，给探头的发射线圈通以双极性矩形脉冲信号，当发射线圈中电流脉冲突然关断时，将在周围产生磁场，该磁场称为一次场，根据导体中的电磁渗透理论，其磁力线穿过套管，在套管中产生涡流*i*即二次场。在脉冲电流的间歇期间，套管中产生的涡流*i*在接收探头的接收线圈中将产生一个随时间衰减的感应电动势 $\varepsilon^{[1]}$ ，即

$$\varepsilon = S \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

式中， ε 为感应电动势； S 为线圈面积； B 为磁通量。

当套管出现孔洞、裂缝，特别是纵向裂缝，这将改变感应电动势 ε 的幅度，在测井曲线上表现出异常，从而通过检测感应电动势 ε 的变化进行套管损伤的探测。通过在发射波形的间歇期对接收线圈上的感应电动势进行采集，从而对套管损伤进行识别。感应电动势的大小与套管的形状、位置及套管自身的电磁参数有关，其数学表达式为

$$\varepsilon = f(T, \mu, \sigma, D, t') \quad (2)$$

式中， T 为套管厚度； μ 为套管磁导率； σ 为套管电导率； D 为套管外径； t' 为井内温度。

当套管的材料发生变化时，磁导率 μ 和电导率 σ 等参数发生改变，感应电动势 ε 会发生变化。当套管出现缩径、扩径、腐蚀、裂缝和孔洞时，会导致相关参数的改变，从而使感应电动势 ε 发生变化。

国家自然科学基金项目(41174160)，陕西省科技统筹创新工程项目(2012KTCL01-10)。

因此可以根据感应电动势 ε 的变化分析计算出套管材料的变化、腐蚀和裂缝等信息,从而确定套管的损坏情况^[2]。

在套管检测系统中,设计了三个磁探头,分别为纵向长探头A、横向短探头B和C。纵向长探头A用于探测纵向裂缝、腐蚀及套管断裂。横向探头B、C是两个完全相同的探头,两者位置垂直分布。C探头用于计算套管的厚度、纵向裂缝及腐蚀,B探头用于探测套管的横缝、射孔、错断和腐蚀,不用于计算厚度。

2. 瞬变电磁测井信号的响应

每种介质的电导率是固定的,因此,介质的改变也将会导致电导率的改变。使用同种的激励源时,不同介质受激励产生的二次场的幅值、衰减时间也有区别。根据相关的理论知识,通过接收线圈接收到的感应电压与时间特性相关计算公式为

$$V(t) \propto \frac{1}{\tau} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 t / \tau} \quad (3)$$

式中, $V(t)$ 为感应电动势; τ 为导体的时间常数。

通过式(3)可知,二次场大致是按照指数规律随时间进行衰减的,对于电导率不同的地层,对应的二次场衰减过程都将不同,一般来说介质的电导率越高,涡流的热损耗就越小,二次场衰减得越慢。在低电导率介质中,恰恰相反,二次场的衰减速度就会比较快,其衰减过程如图1所示。因此,根据此特点就可以利用接收线圈来观测各个时间段的二次场随时间变化的规律,对所测数据进行分析 and 处理,了解地下地层介质及其物理参数。

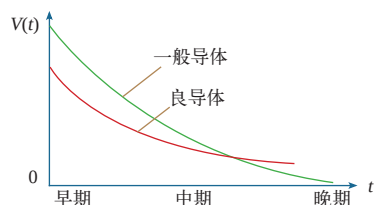


图1 瞬变电磁响应衰减示意图

3. 瞬变电磁理论建模

麦克斯韦方程组是解释电磁场问题的理论基础,是电磁场理论的核心。它解释了电磁场与电

荷、电流之间的相关联系,揭示了电磁场的基本规律。麦克斯韦方程组由安培全电流定律、法拉第电磁感应定律、磁场中的高斯定律和电场中的高斯定律组成,其微分形式为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, A/m; $\mathbf{J}$ 为单位面积上流过的电流强度, A/m²; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量, C/m²; $\mathbf{E}$ 为电场强度, V/m; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度或磁通密度, T; ρ 为电荷体密度, C/m³。式(4)中方程组左边的物理量代表场,方程组的右边是产生各个场的源。

通过 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{B}$ 以及 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{D}$ 之间的关系,就可以计算出电场强度 $\mathbf{E}$ 和磁感应强度 $\mathbf{B}$,其关系式为

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \end{cases} \quad (5)$$

式中, ε 、 μ 和 σ 为介质的介电常数或电容率、磁导率和电导率,它们的量纲分别是F/m, H/m, S/m。将式(5)带入式(4)中就能够得到 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{E}$ 的方程组,进而能够求解出 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{E}$ 的分布情况。根据油气套管井的结构并结合以上分析,建立了套管检测模型。该模型由两层介质构成,介质1表示井液,介质2表示套管。发射线圈和接收线圈放置在井眼中,发射线圈和接收线圈同轴绕制,发射线圈在里面绕制,接收线圈在外层绕制,线圈轴线与井眼轴线重合。各层的电性参数分别为设定为 $\{\mu_1, \sigma_1, \varepsilon_1\}$ 和 $\{\mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2\}$, μ 为磁导率, σ 为电导率, ε 为介电常数, r_1 为套管内半径, r_2 为套管外半径。由于探头与井眼轴线相对称,因此选择柱坐标 (x, y, z) 对模型进行分析。当给发射线圈加以一定频率的脉冲电流时,结合脉冲电流的频率、套管的磁导率和电导率、套管的内外半径就可以对接收线圈上的感应电动势进行处理,通过分析和计算就能够了解测井过程中井下套管的损伤情况。

接收系统对采集到微弱信号的处理方法

1. 瞬变电磁测井仪接收系统设计

接收线圈接收的二次场信号幅值小，只有毫伏甚至微伏级，并可能受到噪声的干扰。为了提高微弱的二次场信号采集准确度，减小噪声对其干扰，要对接收到的信号进行放大、降低噪声干扰和提高信号灵敏度等处理，同时还要满足阻抗匹配、高共模抑制比和电路工作点稳定性等多种要求，因此在信号检测系统中采用了前置放大电路。前置放大器具有高输入阻抗、低输出阻抗、强共模干扰抑制能力，低温漂、低失调电压、增益稳定和可调等特点^[3-5]。电路如图2所示。

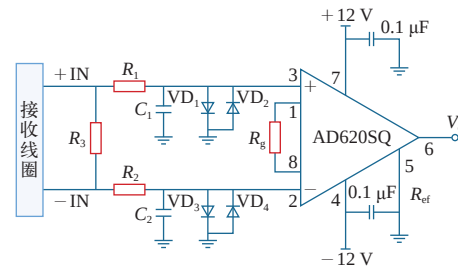


图2 井下接收信号前置放大电路

图2中， R_g 为外接电阻。 R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 分别组成一阶低通滤波器，滤除接收线圈上的高频噪声。 R_1 、 R_2 和 R_3 还可以限制输入电流，防止电流过大而烧毁AD620SQ。 $VD_1 \sim VD_4$ 为保护二极管，限制接收线圈输出信号的幅值。AD620SQ结构简单，电压增益范围宽，只要改变电阻 R_g 的值即可实现从1~10 000的任一增益，可以很方便地调节AD620SQ的放大倍数。

2. 接收微弱信号的处理方法

在接受信号系统中，采集到的是微弱的二次场信号，二次场信号的特点是早期衰减慢，幅值大；中期衰减快；晚期衰减慢，幅值小。采集前期大幅值信号要降低其放大倍数，防止信号过大带来的饱和失真，而对后期微小的信号需要提高放大倍数来防止其信号过小带入截止失真对其的干扰。所以考虑在接收系统中设计并使用分段衰减统一放大的信号处理方法，如图3所示。

所采集的瞬变二次场信号动态范围大、早期

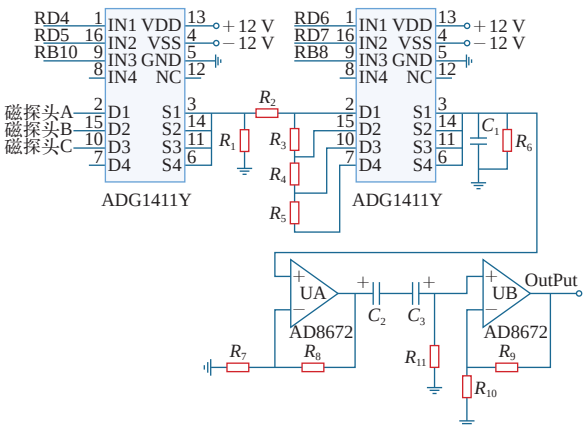


图3 可变增益放大电路

信号幅值大，衰减速度快；晚期信号幅值微弱，衰减时间长，所以采取模拟积分采样方式。通过单片机控制对不同的磁探头信号进行分时采集，并通过选择不同的积分电阻对信号进行累加，以提高信噪比、采样的准确度与分辨率，可以进一步减小信号的动态范围^[6]。设计电路如图4所示。

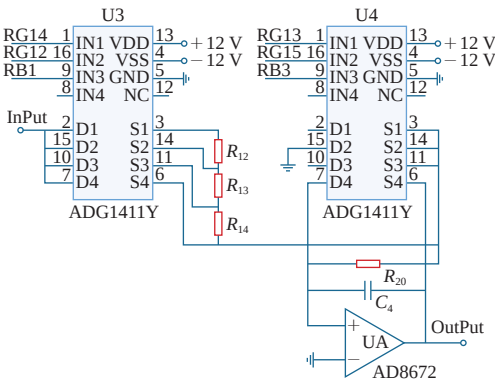


图4 接收信号的积分电路

信号采集方法的可行性分析

1. 瞬变信号的动态范围

在电磁探伤套管检测中，利用接收线圈观测到的感应电压的异常幅度和衰减速度很大程度上决定于套管的时间常数 τ 值。在良导体套管中 τ 值较大，尽管初始响应的幅值并不是很大，但衰减却相当慢，典型的衰减时间范围从100~200 μ s到10~20 ms，在这么宽的时间范围内，在早期信号的幅值高而且衰减速度很快，在晚期信号的幅值很弱而且衰减缓慢^[5]。对同一个观测点而言，从早期到晚期的信号幅值从 $n \times 10^5 \mu$ V变到0 μ V。异常

的幅值除了跟 τ 值有关外,还与套管的形状和被观测点的位置有关。

2. 瞬变信号的频带

瞬变电磁方法实际上是宽频的电磁系统。在理论上,瞬变电磁信号的频谱可以无限延伸,其中包括了频域电磁方法的整个频带($n \sim n \times 10^4$ Hz),而在实际上由于随着谐波次数的增高而能量变弱,另外,对于非调谐式的宽带接收装置而言,频带过宽会使系统的信噪比下降,基于这两方面的因素,接收装置的通频带一般应选在 $0 \sim n$ kHz的范围^[7]。由于瞬变电磁法检测仪的检测受到外部噪声电平限制,在选定了信号频带的情况下,应采取必要的措施提高仪器的检测灵敏度、抗干扰能力,通过对数据进行滤波处理,或增大发送功率等,以提高晚期信号采样点数据的信噪比。

结束语

瞬变电磁法测井,不同于漏电流或井壁接触法测井,其是基于瞬变电磁原理,具有可持续时间长、信号采集率高等特点。但井下原始的采

样信号为微弱的电磁信号,需要对原始的井下信号进行滤波放大等方法处理,并分析信号的可用性,才可以应用到后期的解释中。

参考文献

- [1] 牛之链. 时间电磁法原理 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2007.
- [2] 沈鹏征, 马桥斌. 套管损伤检测仪信号噪声和干扰的分析与解决方法 [J]. 电子测试, 2012 (10).
- [3] 袁真, 袁满. 数据采集电路的噪声抑制 [J]. 重庆工学院学报, 2005 (3).
- [4] 刘竹琴, 白泽生. 传感器电路的噪声及其抗干扰技术研究 [J]. 现代电子技术, 2011 (12).
- [5] 杜少武, 林东栋. DC/DC转换器的电磁兼容技术 [J]. 电源技术应用, 2008, 11 (6).
- [6] 华成英, 童诗白. 模拟电子技术 [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 潘泉, 张磊, 孟晋丽. 小波滤波方法及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(收稿日期: 2015-02-10) EA

(上接第169页)

1) 光伏发电式遮阳板系统在光线强时, 能达到较好的遮阳效果, 同时利用太阳能发电; 在光线弱时, 反射太阳光至室内提高光照水平, 实现对清洁能源的利用, 减少空调机和照明系统的损耗。

2) 光伏发电式遮阳板系统遮阳板角度可调, 随着光照强度的变化实现遮阳板角度的自动调节, 同时遮阳面所产生的电能储存于蓄电池内, 实现对负载的分级供电。

3) 光伏发电式遮阳板系统采用物联网技术, 配合无线通信网络, 实现信息的传播与共享。

参考文献

- [1] 赵晶, 赵争鸣, 周德佳. 太阳能光伏发电技术现状

及其发展 [J]. 电气应用, 2007, 26 (10): 6-10.

- [2] 陈军. 建筑活动式外遮阳的适应性技术 [J]. 工程与建设, 2006, 20 (5): 447-449.
- [3] 潘丽阳, 付本臣, 曹炜. 寒冷地区建筑遮阳体系的冬夏功能转换设计研究 [J]. 建筑技艺, 2013 (6): 216-219.
- [4] 黄永. 智能百叶与建筑遮阳 [J]. 华中建筑, 2003 (21): 77-78.
- [5] 陈江辉, 谢运祥, 陈兵. 逆变电路的控制技术与策略 [J]. 电气应用, 2006, 25 (9): 102-106.
- [6] 童晓渝, 房秉毅, 张云勇. 物联网智能家居发展分析 [J]. 移动通信, 2010 (9): 16-20.
- [7] 廖常初. 人机界面的发展趋势 [J]. 电气应用, 2006, 25 (12): 14-16.

(收稿日期: 2015-04-23) EA