开发设计·

井中瞬变电磁法理论研究*

杨 阳 党瑞荣 任志平
(西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室 陕西 西安)

摘 要: 文章对井中瞬变电磁法的基础理论进行了研究,对井中瞬变电磁场的分布特征、视电阻率计算方法、时间-深度换算方法进行了论述,并介绍了井中施工的装置形式,为井中瞬变电磁探测技术的进一步研究提供了理论依据。

关 键 词: 瞬变电磁法; 井中; 全空间; 探测

中图法分类号: P631.8+1 **文献标识码**: B **文章编号**: 1004-9134(2009)03-0001-03

0 引 言

地面瞬变电磁法勘探与其他物探方法相比具有体积小、工作效率高、纵横向分辨率高和对低阻反应灵敏等优点,并且已广泛应用在金属矿勘探,石油资源勘查,地下金属管线探测,地下水和环境污染及工程探测等方面。将地面瞬变电磁法应用于井下,采用多匝数、小回线组合装置进行井中探测,从理论上分析,不仅具有比地面瞬变电磁法分辨率高、体积效应小、旁侧影响小、测量快速和轻便等优点,同时可以弥补井下直流电法勘探无法探测的井下地质问题[1]。根据理论分析以及前人所做的试验研究,井中瞬变电磁法可以解决地面瞬变电磁法和井中直流电法无法解决的问题,是一种很有前景的探测方法。

井中瞬变电磁场分布规律受井周围空间有效探测范围内所有岩层导电性的综合影响,井中探测固有的特殊理论问题是全空间地球物理场问题。而地面瞬变电磁场分布特征和探测技术是建立在半空间条件下的,不能适用于井中瞬变电磁法。因此,弄清瞬变电磁场的全空间分布规律是真实认识井中地电响应特征的基础。

1 井中瞬变电磁法基本理论理

1.1 基本原理

地面瞬变电磁法的发射框沿地面布设,有效探测范围为地下半空间。而井中瞬变电磁法的接收发射线圈是位于井中的,由于井中空间很小,观测面前后与上下都有介质存在,故被称为全空间瞬变电磁法。井中瞬变电磁探测技术正是以全空间瞬变电磁法为基础的,它利用置于井中并通以一定电流的发射线圈,在其周围空间产生一次电磁场,并在井眼周围导电岩矿体中产生感应电流。在电流断开之前,发射线圈在其周围空间中建立起一个稳定的磁场。当电流突然断开时,由该电流产生的磁场也立即消失,一次磁场的这一剧烈变化通过井里的空气和周围导电介质传至线圈周围的岩层中,并在岩层中激发出感应电流以维持发射电流断开之前存在的磁场,使空间的磁场不会即刻消失。在岩层中激发的感应电流又称为涡流,此电流随时间变化,因此在周围又产生新的磁场,由于介质的欧姆损耗,涡流将迅速衰减,由它产生的磁场也随之迅速衰减,这种迅速衰减的磁场又在其周围的介质中感应出新的强度更弱的涡流。这一过程继续下去,直至大地的欧姆损耗将磁场能量消耗完毕为止,这便是地层中的瞬变电磁过程,伴随这一过程存在的电磁场便是井眼周围地层的瞬变电磁场,感应磁场主要来源于井眼周围岩层中的感应电流,因此它包含着与岩层有关的地质信息。

由于电磁场在空气中传播的速度比在导电介质中传播的速度大得多,当一次电流断开时,一次磁场的强烈变化首先传播到发射线圈周围的介质中,因此,最初激发的感应电流局限于井眼附近的岩层中。随着时间的推移,感应电流便逐渐向外扩散,其强度逐渐减弱,

基金项目: 井中瞬变电磁法剩余油探测技术 863 计划资助(编号:2007AA06Z217);
感应式过套管电阻率测井理论和方法中国石油天然气集团公司中青年创新基金资助(编号:07E1013)

第一作者简介: 杨 阳,女,1984 年生,硕士研究生,就读于西安石油大学,专业为测试技术计量与仪器,目前主要研究方向为井中瞬变电磁法剩余油探测技术。邮编:710065

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分布趋于均匀。研究结果表明,用接收线圈接收的瞬变电磁场是井周围岩层中涡流产生的,其涡流可以近似地用圆形电流环表示。这些电流环就像由发射线圈吹出的"烟圈",其半径随着时间的延迟而增大,传播速度与地层电导率成反比,深度随时间的延迟而加深。因此,将井眼周围岩层中涡旋电流向外扩散的过程形象地称为"烟圈效应",如图 1 所示[2]。

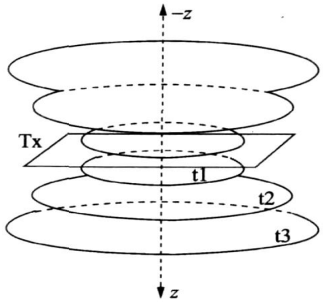


图 1 岩层中感应电流环带分布

1.2 井中瞬变电磁场的分布特征

由于井中瞬变电磁场的分布特征是以全空间为前提条件的,并且井中所采用的装置形式大部分可视为偶极装置,因此要研究井中瞬变电磁场规律必须先分析全空间中磁偶极子形成的瞬变场。假设空间为均匀空间,给发射线圈通一阶跃电流,当此电流断开时时间域电磁场各个分量的表达式[3]:

$$H_R = \frac{2M}{4\pi r^3}\left[\phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}}u\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)\right]\cos\theta \tag{1}$$

$$H\theta = \frac{2M}{4\pi r^3}\left[\phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}}u(1+u^2)\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)\right]\sin\theta \tag{2}$$

$$E_\phi = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{M\rho}{4\pi r^4}u^5\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)\sin\theta \tag{3}$$

其中:

$u = 2\pi r/\tau$

$\tau = \sqrt{2\pi\rho t}\times 10^7$

$r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$

$M = NIS$ 为磁矩,N 为发射线圈匝数,I 为供电电流强度,S 为电流环的面积,$\phi(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_0^u \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)\mathrm{d}t$,为概率积分。

通过球坐标与直角坐标间的变换关系,可将上述表达式转化为直角坐标下的表达式:

$$E = \frac{\pi M\theta^3 r}{2\pi^{3/2}}e^{-\theta^2 r}\left(-\frac{Z}{r}i_x + \frac{y}{r}i_z\right) \tag{4}$$

$$H = \frac{M}{4\pi r^3}\left\{\left[\left(\frac{4}{\pi^{1/2}}\theta^3 r^3 + \frac{6}{\pi^{1/2}}\theta r\right)e^{-\theta^2 r^2} + 3erfc(\theta r)\right]\times\left[\frac{x^2}{r^2}i_x + \frac{xy}{r^2}i_y + \frac{xz}{r^2}i_z\right] - \left[\left(\frac{4}{\pi^{1/2}}\theta^3 r^3 + \frac{2}{\pi^{1/2}}\theta r\right)e^{-\theta^2 r^2} + erfc(\theta r)\right]i_x\right\} \tag{5}$$

其中,$\theta = \sqrt{\mu\sigma/(4t)}$,$erfc(\theta r) = 1 - erf(\theta r) = 1 - \frac{2}{\pi^{1/2}}\int_0^\theta e^{-v^2}\mathrm{d}v$,$erf(\theta r)$ 为误差函数,$erfc(\theta r)$ 为余误差函数。

在实际探测中,用线圈测得的是感应电动势,感应电动势的表达式为 $\varepsilon = -\mu sn\frac{\partial H}{\partial t}$,$s$ 为接收线圈面积,n 为接收线圈的匝数。因此,求磁场对时间的倒数更有意义,对式(5)做代数变换可得到磁场的时间导数:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{M\theta^3}{\pi^{3/2}t}e^{-\theta^2 r^2}\times\left[\theta^2 r^2\left(\frac{x^2}{r^2}i_x + \frac{xy}{r^2}i_y + \frac{xz}{r^2}i_z\right) + (1-\theta^2 r^2)i_x\right] \tag{6}$$

对上述表达式分析可得出:在发射线圈、发射电流、功率以及频率一定的情况下,感应磁场只与时间以及地层电导率有关。随着时间的推移,接收线圈可以测到井周围不同地层的地质信息,而地层信息正是由电导率来反映的。在其他条件一定的情况下,当观测点位于发射线圈的轴线上时,磁场的时间导数与地层电导率成反比。图 2 为发射线圈在轴线上产生的瞬变磁场,且发射线圈的磁偶极方向与 x 轴同向。当时间大于 10^4 ms 时,磁场趋于常数$\frac{1}{4\pi r^3}$或$\frac{1}{2\pi r^3}$,而磁场对时间的导数则随 $t^{-5/2}$衰减。

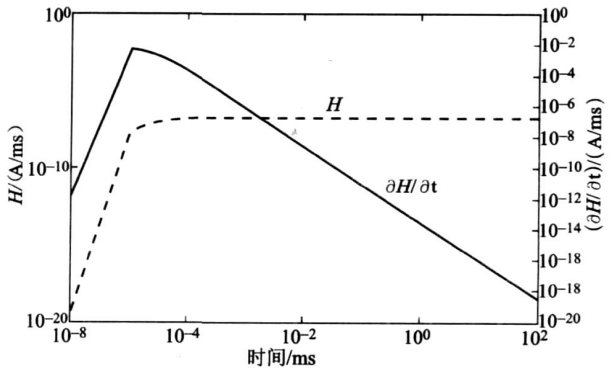


图 2 发射线圈在轴线上产生的瞬态场

1.3 井中瞬变电磁法视电阻率的计算

由于井中瞬变电磁探测是在地面下进行的,置于井中的接收线圈测得的感应场为全空间瞬变响应,视电阻率表达式与地面视电阻率表达式应有所区别,而目前没有适合于多匝小回线装置的视电阻率换算公式,计算中大多沿用半空间的早、晚期视电阻率换算公

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式,其计算出的视电阻率值偏小,与实际情况极不相符,不利于异常特征辨别与资料解释。因此本文给出了井中瞬变电磁法视电阻率计算公式[4,5]:

$$\rho_\tau = C \times \frac{\mu_0}{4\pi t t} \times \left(\frac{2\mu_0 SNsn}{5t(V/I)}\right)^{2/3}$$
$$= C \times 6.32 \times 10^{-12} \times (S \times N)^{2/3} \times (s \times n)^{2/3} \times (V/I)^{-2/3} \times t^{-5/3} \quad (7)$$

式中,C 为全空间响应系数;S,N 分别为发射线圈的面积和匝数;t 为二次场衰减时间;V/I 为归一化二次场电位值。

1.4　井中瞬变电磁法时间-深度换算方法

根据电磁场"烟圈效应"理论可知,电磁场在地下介质中传播速度 v 与地下电性介质的分布以及时间有关,因此,可定义电磁场传播深度 $D(t)$ 为时间的函数:

$$D(t) = \int v(\rho, t)\,\mathrm{d}t \quad (8)$$

式中,ρ 为地下介质电阻率,t 为时间,如果用视电阻率 ρ_s 代替上式中的 ρ,则深度定义为:

$$Ds(t) = \int v(\rho_s, t)\,\mathrm{d}t \quad (9)$$

由上式可知,如果已知电磁场的传播速度,即可计算不同时刻对应的深度。

对于地下半空间为不均匀分布的导电介质或任意导电介质分布情况下,电磁波在地下传播规律和均匀介质一样,必须满足麦克斯韦方程组,其发现线圈中心电磁场垂直扩散速度与均匀介质情况扩散速度满足一定比例关系,即任意导电介质分布情况下电磁场垂直扩散速度 v_s 和深度 D[6]为:

$$v_s = \alpha \frac{\sqrt{\gamma}}{\sigma_i \mu a} \times \left[C_1 + (C_1^2 + 2)^{1/2} + \left(1 + \frac{C_1}{(C_1^2 + 2)^{1/2}}\right)\gamma C_2\right] \quad (10)$$

$$D = v_s \times t_i \quad (11)$$

式中,

$$C_1(\gamma) = \frac{3\sqrt{\pi}}{4}\left[1 - \frac{\gamma}{4} - \sum_{k=2}^{\infty}\frac{(2k-3)!!}{k!(K+1)!}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^k\right]$$

$$C_2(\gamma) = \frac{3\sqrt{\pi}}{4}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(2k-1)!!}{k!(K+1)!}\left(\frac{\gamma}{2}\right)^k$$

$\gamma = \sigma_i \mu a^2 / 4t_i$,$\sigma_i$ 为 t_i 时刻对应的视电阻率值,a 为发射线圈的面积,α 为全空间响应系数,通过理论模型和实际资料验证,系数 α 值在 0.4～0.6 范围内。对实际测量的视电阻率-时间曲线,通过式(10)和(11)的换算可得到视电阻率-深度曲线,从而可确定导电介质的电性分布与深度的对应关系。

2　井下装置形式

井下探测系统主要由波形发生器、发射线圈、接收线圈、放大器、模数转换器和电源等几部分组成。由于井中空间有限,不能采用地面上的大回线装置,所以只能利用多匝小线圈,采用剖面装置方式。剖面装置方式通常有同点方式和偶极方式。同点方式又分为重叠回线和中心回线。重叠回线的接收线框边长与发射线框一致,此装置形式与地质探测对象呈最佳耦合状态,响应曲线形态简单,异常幅度较大且非常便于分析解释,施工方便灵活,但发射与接收线圈间存在较大互感,影响早期数据采集。中心回线为重叠回线的改进形式,其接收线框采用多匝小回线或等价接收面积的磁感应探头,除具备重叠回线装置的优点外,还克服了重叠回线发射与接收线圈之间的互感,与之而来的是降低了施工的灵活性[7]。

与同点装置相比,偶极装置具有如下特点:一次场影响较小,对于需要较早延时采样数据的浅层勘探而言,偶极装置由此而显示出了较大的优势;探测分辨能力较强,对一些低阻局部异常体反应较为敏感,在相同条件下,偶极装置能探测出更深的低阻局部异常体。井中的偶极方式通常有两种:共面方式和共轴方式,如图 3 所示。共面方式是指发射线圈和接收线圈处于同

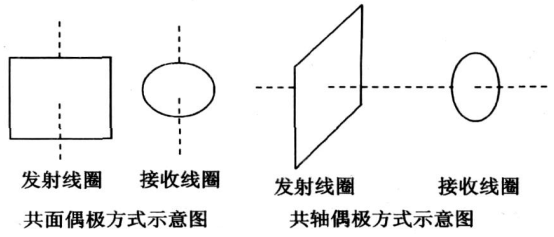


图 3　井中的偶极方式

一个平面内,这种方式适合探测与井壁方向垂直的地层信息,发射与接收线圈的轴线平行且垂直于井壁;当需要探测沿井轴方向的地层信息时,应采用共轴方式,这种方式要求发射线圈所在平面与接收线圈所在平面平行,且轴线处于同一条直线上。

3　结　论

(1)推导了全空间瞬变电磁场在直角坐标下的时域表达式,直接从时域分析井中瞬变电磁场的分布特征可计算更为复杂的地电模型场的穿透深度、"烟圈"的扩散速度,为野外施工设计提供更精确的数据。

(2)根据瞬变电磁场"烟圈效应"理论,推导出井中瞬变电磁视电阻率计算公式和由视电阻率-时间曲线

(下转第 7 页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

作发送,一块作接收,接收端通过串口把数据传送给计算机,利用串口调试程序可以看到接收到的数据。经试验,在装上专用的 433 MHz 数传天线后,可在 80 m 的范围内保证数据的有效传输。

软件流程图如图 4 所示。

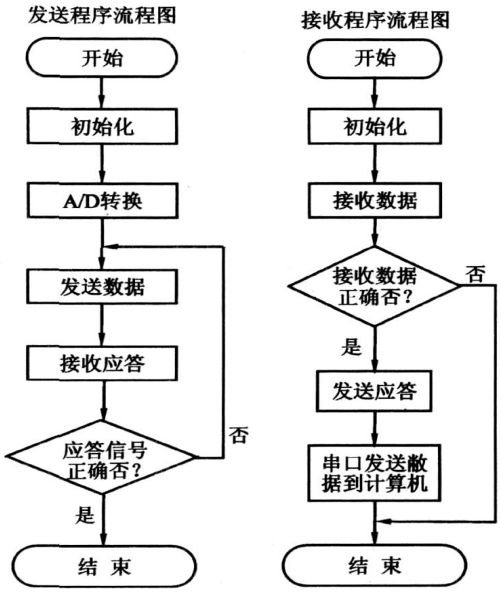


图 4　发送和接收流程图

4　结束语

无线通讯技术作为一种短距离、高速率、低功耗无线网络技术,在许多领域已得到广泛应用。Chipcon 公司的 CC1010 芯片,发送和接收模块实物如图 5 所示。是一个单芯片、超高频射频芯片,使用 CC1010 芯片作为无线节点,在井场建立一个无线传输网络,取代有线

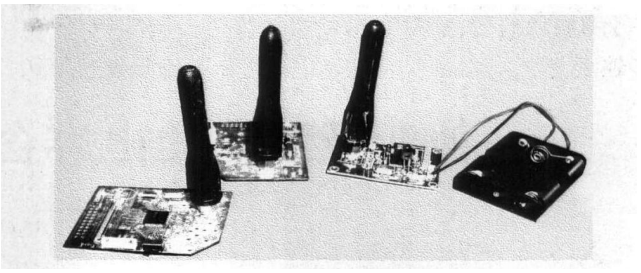


图 5　发送和接收节点模块实物图

传输方式,可以很方便地建网,不用布线,可以有效减少后期维护工作量,更可以在此基础上实现井场的远程监控。

参 考 文 献

[1] 戴永寿,马西庚. 基于现场总线的生产井录井仪及其专家系统[J]. 仪器仪表学报,2004,25(1)

[2] 沙　超. 无线传感器网络硬件平台的研究与设计[J]. 电子工程师,2006,32(5)

[3] 苏堪华,周光陈. 组建钻井井场无线传感器网络的有关问题分析[J]. 石油机械,2006,34(4)

[4] 金　纯. IEEE 802.11 无线局域网[M]. 北京:电子工业出版社,2004

[5] 麻信洛. 无线局域网构建和应用[M]. 北京:国防工业出版社,2006

[6] Chipcon 公司. CC1010 数据手册[Z]. 2002

[7] 吴少军,刘光辉. 实用低功耗设计 - 原理、器件与实用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003

[8] 李文仲,段朝玉. CC1010 无线 SoC 高级应用[M]. 北京:北京航天航空大学出版社,2007

(收稿日期:2008 - 11 - 13　编辑:高红霞)

(上接第 3 页)

计算视电阻率 - 深度曲线的数学模型,为井中瞬变电磁法的进一步研究提供了理论依据。

(3)给出了适合于井中使用的装置形式,并讨论了同点装置和偶极装置各自的特点和使用条件,为井下装置的设计提供了思路。接收和发射线圈的设计是探测系统的重点研究对象,因此应结合井中的实际环境对线圈结构作进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 丛茂祥,张爱印,张利芳. 矿井瞬变电磁法探测井下工作面顶、底板的含水构造[J]. 江苏地质,2004,28(4)

[2] 闫　述,陈明生,傅君眉. 瞬变电磁场信号在地下的扩散及地面上的时域响应特性[J]. 煤田地质与勘探,2001,29(2)

[3] Kaufman A. A, Keller GV. Frequency and Transient Soundings[M]. New York: Elsevier, 1983

[4] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京:地质出版社,1998

[5] 于景　. 矿井瞬变电磁法理论与应用技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2000

[6] Lee T. Estimation of depth to conductors by the use of electromagnetic transients[J]. Geophysics. 1977,65(2)

[7] 岳建华,姜志海. 矿井瞬变电磁探测技术与应用[J]. 能源技术与管理,2006,34(5)

(收稿日期:2008 - 12 - 31　编辑:姜　婷)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ABSTRACTS

Vol. 23 No. 3 Jun. 2009

Yang Yang, Dang Ruirong and Ren Zhiping. Research on transient electromagnetic method in borehole. PI, 2009,23(3):1～3,7

The fundamental theory of transient electromagnetic method in borehole is researched. The distribution characteristics of transient electromagnetic field in borehole, calculation procedure of apparent conductivity and the method of time-depth conversation are expounded, and loop configuration in the borehole is introduced. These provide theoretical basis for further studying transient electromagnetic systems in borehole.

Key words: transient electromagnetic method; borehole; whole space; detection

Han Bin, Li Jiaoman, Li Chuanwei and Tian Wenxin. Design and realization of wireless node for drilling field data collection. PI, 2009,23(3):4～7

In this paper, a wireless transmission mode is introduced by improving on drilling field data collection sensor which is adopted wire transmission currently. The comparsion of a few wireless transmission modes indicates that drilling field data can transmit by wireless networks used CC1010 with 802.11b (Wi-Fi). An example of collecting the data of mud temperature is presented. Finally, the transmission data mode is wireless instead of wire in available range of wireless node transmission.

Key words: oil drlling; wireless node; node communication protocol; wireless local area network; star connection; CC1010

An Dongjie. Design of a new capacitive water holdup sensor and its application. PI, 2009,23(3): 8～9,12

The capacitive water holdup sensor has been widely used in production profile, but by the sensor's structure and processes constraints, the electrodes' contamination is serious, and the insulation is not high, and it is easily damaged during the process of installation and using, so we develop a sensor of new structure. The electrode is installed in the insulating layer integratively, and it has many high indicators such as high-temperature, high-voltage and good insulation performance, the logging tool using this sensors has already been put into use in Daqing oil field and Kazakhstan oil field. The article describes the sensor's structure principle and application.

Key words: capacitance; holdup; structure; application

Zang Defu and Wang Shusong. Smart control system of the hydraulic logging winch. PI, 2009,23(3): 10～11

This paper gives a description on the working principle of Hydraulic Logging Winch. The smart control system can record tension, speed and depth, and stop the logging winch by the three parameters preset, the function of constant speed and constant tension are realized, which prevents the down hole tools from falling into the wellbore, the risk of logging service will be greatly reduced and the safety will be ensured.

Key words: hydraulic logging winch; intellectualization; constant speed; constant tension

Sun Liangwei. Development of hydrostatic testing system of tubing and casing. PI, 2009,23(3):13～15

The hydrostatic testing system of tubing and casing is presented in this paper. The maximum testing pressure can reach to 69 MPa in the hydrostatic test of tubing and casing, It can automatically complete the pressure test, achieve real-time remote monitoring for the testing process, data collecting, recording and analysis and test report printing, ect. It can provide a strong protection for regulating the market of oilfield, improving the quality of product and controlling substandard products into the oilfield.

Key words: tubing and casing; hydrostatic pressure; test

Hu Chaohong, Zou Yueyuan, He Jiannan and Li Yao. Development of SKG-5700 four-arm caliper tool. PI, 2009,23(3):16～17

SKG-5700 four-arm caliper tool can be combined with the dual lateral logging tool in 5700 ECLIPS system. It solved the technical problem that X-Y caliper derived from traditional 1016 DIPLOG tool with great cost and huge risk.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net