

# 深层钻探的电磁信息传输方式研究

张清<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074; 2. 中基发展建设工程有限公司,北京通州 101100)

**摘要:**电磁随钻技术承载信息量大、传输速度快,便于对井下情况进行实时监控,受钻井工艺的影响小,近年来该技术的应用发展十分迅速。概述了目前井下钻探中电磁信号传输应用的基本方式,采用等效传输线方法<sup>[2]</sup>分析了井下发射极的结构参数,并进行了初步试验验证。试验结果能部分验证理论的正确性,但仍有部分参数的计算无法根据理论模型做出合理解释,其试验结果也不甚合理,尚需进一步改善理论模型,以便更好地理解钻杆/大地电磁传输系统。

**关键词:**随钻测量;电磁波;发射极结构参数

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)10-0015-03

**Study on Electromagnetic Information Transmission for Deep Drilling/ZHANG Qing<sup>1,2</sup>** (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. China SOLIBASE Engineering Co., Ltd., Beijing 101100, China)

**Abstract:** Electromagnetic measurement while drilling can provide large amount information with high transmission rate, this technique was rapidly applied and developed in recent years. The paper summarized the basic modes of electromagnetic signal transmission in downhole drilling, analyzed the structure parameters of downhole emitting electrode by equivalent transmission line with primary test. The results could only partly prove validity of the verification theory; other parts of parameter calculation could not get the reasonable explanation by theoretical model, which need further improvement to understand drilling rod / magnetotelluric transmission system.

**Key words:** MWD; electromagnetic wave; structure parameters of emitting electrode

## 0 引言

随着随钻测井特别是地质导向技术的发展,需要传输的地下信息越来越多,原有的泥浆脉冲传输技术信息含量低、传输速度慢,难以满足智能化钻井技术的需要,而且在空气钻进、雾化钻进、泡沫钻进等由单纯的气体或气液两相流体作为钻进流体的相关钻进方法中,当钻井液中气体含量超过20%以后,气体的可压缩性使得压力波信号发生变形,导致在地面上很难检测出正确的信号,泥浆脉冲遥测技术就难以应用。

自20世纪90年代以来,电磁随钻测量技术在欠平衡钻井的应用中得到了很大发展。就目前而言,它是在欠平衡钻井中实时传输井下数据的一种最有效的方法,而且从理论上讲电磁随钻测量不但能在欠平衡钻井中应用,也可以在普通工艺的钻井中应用。它不受井斜角大小、钻井液(介质)、钻井方式(旋转钻或滑钻)等条件的限制,有相当好的发展前景。由于上述原因电磁波随钻遥测技术作为一种替代技术近年来发展很快。

## 1 电磁信号传输的基本方式

理论上,电磁波随钻测量发射天线大致可以设计成3种方式,如图1所示。

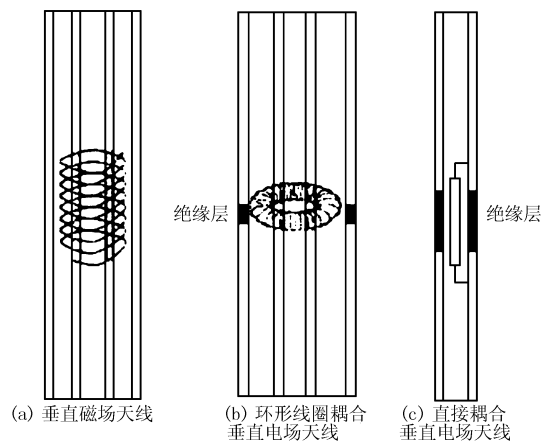


图1 常见发射天线示意图

目前国外的电磁随钻测量系统信号发射方式多为直接电激励模式,其原理是把调制好的载波信号以变化的电流或电压信号直接加载于发射端的两个极上。利用“钻柱-地层”系统把信号传输到地表。

收稿日期:2009-04-14; 改回日期:2009-09-07

作者简介:张清(1973-),男(汉族),黑龙江人,中国地质大学(武汉)博士研究生在读、中基发展建设工程有限公司岩土分公司经理,地质工程专业,从事钻探技术与管理工,北京市通州区翠屏西路104号,zhangqing@solibase.com。

国外的这类电磁信号传输装置多采用足够长的绝缘段把两极分开,如图 1(c)所示。这种方式的优点在于钻杆柱和下面的一极可以根据需要分开适当距离,改变绝缘段的安装位置可以改变下面一极的长度,在深层钻探时这一点特别重要。它的缺点在于绝缘管要和钻杆或套管一样承受钻压、扭矩和拉力,需要高强度的绝缘管。目前,国内市场上尚无此类高强度绝缘管,本文采用的是图 2 所示的双管作为发射两极,将杆内激励器一段接至杆内壁,另一端通过外壁上的绝缘孔 K,与杆外包裹的金属环 A 相接。此种方法进行轴向电流激励,与截断钻杆的双极激励相比多了一个分流回路,但可获得接近于双极激励的效率。由于内管仍为钻杆,外面的套管仅作为发射的一极而不承受钻压,因而,对其强度要求较低。它的缺点在于内外的间隙较小,对绝缘层的制作要求较高,难以做成任意长度,不利于深井钻进使用。本文的主要研究针对后者的形式,为把发射极的结构参数设计优化,需要对电磁信道传输特性的方法进行分析。

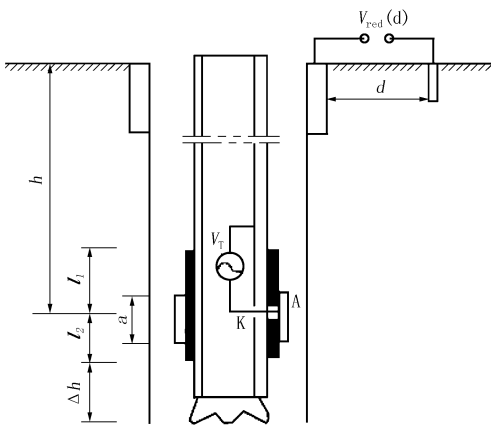


图 2 地下非对称双极激励装置图

## 2 等效传输线模型与理论分析

目前,常用的分析电磁信道传输特性的方法有两种,一种是把钻杆当作传输导线的所谓等效传输线法<sup>[2-4]</sup>,另一种是求场的边界值的方法<sup>[5]</sup>。采用哪一种分析方法与电磁发射的方式并无直接的关系,但与发射电极所连接的信号输出端有关。一般而言,发射信号输出端正极连接上部钻杆,负极连接在绝缘管下部的一极,或连接在双管装置的外管,才采用等效传输线的分析方法。所谓等效传输线即把钻杆或套管系统看作是同心电缆传输线方式。文献[4]认为可以近似地把电磁波在井中的传输看作同轴电缆作为波导传输。钻杆柱和套管可看作是导

线,无限远的地层可看作屏蔽层,钻孔周围的地层可看作绝缘性能不太好的绝缘层。文献[2]则把激励回路等效成图 3(b)的方式并给出了详细的计算公式,本文按照文献[2]的方法对双管结构的外管发射极进行了分析。为使发射极结构参数优化,分析了外套管(发射极)长度、绝缘段长度以及绝缘段和金属套长度之比对地面检测电压的影响。

为方便叙述,我们将图 1(c)的激励方式称作激励方式 a,等效电路为图 3(a);图 2 的激励方式称作激励方式 b,其等效电路为图 3(b)。

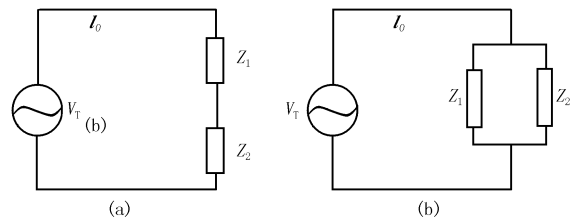


图 3 激励回路等效电路

假设大地是均匀地层,在这种情况下,等效传输线单位长度上的串联电阻  $r$ 、电感  $L$ 、并联电导  $G$ 、电容  $C$  为:

$$R \approx \rho_s / (2b\tau)$$

$$L(z) \approx \frac{\mu_0}{\pi} \int_b^{\frac{\pi z}{2}} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{\pi z}{4b}$$

$$C(z) = \pi \epsilon_r \epsilon_0 \left( \ln \frac{\pi z}{4b} \right)^{-1}$$

$$G(z) = \frac{\pi}{\rho} \left( \ln \frac{\pi z}{4b} \right)^{-1}$$

式中: $b$ ——钻杆外半径; $\tau$ ——钻杆壁厚; $\rho_s$ ——钻杆电阻率; $\rho$ ——地层电阻率; $\epsilon_r$ ——地层相对介电常数; $\epsilon$ ——真空中介电常数; $\mu_0$ ——真空中磁导率。

对激励方式 b,采用图 4 所示的等效模型;对方式 a 也可类似地表示。图 4 中弧线表示钻杆裸露部分和馈电孔处外层导电环套间通过地层介质的泄漏电流密度线。在均匀地层下,这些电流密度线可近似地假设具有以  $\frac{z}{2}$  点为中心并以  $\left| \frac{z}{2} \right|$  为半径的球形分布。

传播系数:

$$\gamma(z) \approx \sqrt{(R_1 + j\omega L_1) G_1}$$

特征阻抗:

$$Z_0(z) \approx \sqrt{(R_1 + j\omega L_1) / G_1}$$

地面检测电压:

$$I_1 = V_0 / Z_1$$

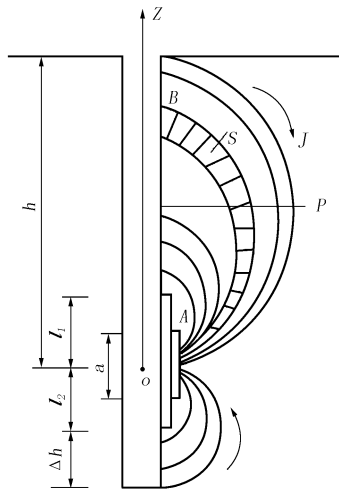


图 4 泄漏电流密度分布

$$Z_1 \approx Z_0(l_1) \operatorname{cth} \left[ \int_{l_1}^h \gamma(z) dz \right] + \frac{\rho}{\pi a} \ln \frac{\pi l_1}{4b}$$

$$I_0 = V_0 (Z_1 + Z_2) / (Z_1 Z_2)$$

$$Z_2 \approx \frac{\rho(a + \Delta h)}{\pi a \Delta h} \ln \frac{\pi l_2}{4b}$$

$$V_r(h, d) \approx 2I_1 Z_0(h) \frac{\ln(\frac{d}{b})}{\ln(\frac{\pi h}{4b})} e^{-\int_{l_1}^h \gamma(z) dz} \quad (1)$$

对于方式 a, 需做如下调整, 再将参数回代公式 (1) 中即可:

$$Z_1 = \frac{V(l_1)}{I(l_1)} = Z_0(l_1) \operatorname{cth} \left[ \int_{l_1}^h \gamma dz \right]$$

$$Z_2 \approx \frac{\rho}{\pi \Delta h} \ln \frac{\pi l_2}{4b}$$

$$I_0 = I_1 = V_T / (Z_1 + Z_2)$$

### 3 计算中使用的参数与计算结果

根据上述公式, 可得到激励装置尺寸参数与检测信号的关系, 进行激励装置参数合理选择和设计。利用 Matlab 编写出计算机程序, 并将计算结果绘制成图形。

(1) 计算所使用的参数如表 1 所示。

表 1 计算所用常参数

信号电 压/V	钻杆外半 径 $b_1$ /m	钻杆壁 厚 $\tau$ /m	相对电阻率 $\rho$ / $(\Omega \cdot m)$	天线长 度 $l_1$ /m	孔深 $h$ /m	频率 $f$ /Hz
36	0.1	0.01	25	1.5	600	10

(2) 计算结果。图 5 中纵坐标为检测电压分贝值, 横坐标为套管长度。图中的星号的数据是频率为 10 Hz 时的计算值, 三角形是 20 Hz 时的计算数据。两种数据重合在一起, 说明频率对它们之间的

关系没有影响。随套管长度增大, 信号电压也增大, 但不是线性的增大。可知设计套管长度要根据信号接收需要、加工难易程度、加工成本等因素综合考虑。

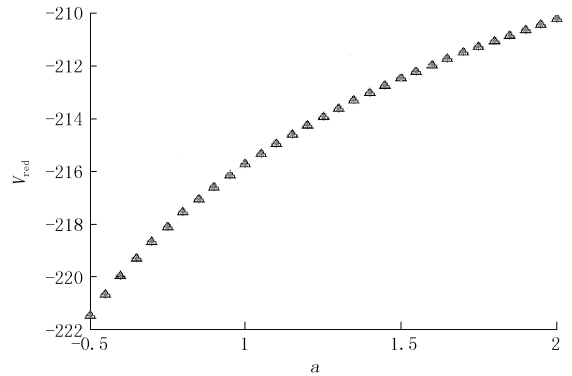


图 5 外套管(发射极)长度与地面检测电压的关系

另外, 计算了绝缘段长度以及绝缘段和金属套管长度之比对地面检测电压的影响, 但无法得出合理的数据, 计算结果从略。

### 4 试验与结果

针对图 5 的结果, 进行了试验验证。采用不同的外套管长度, 令一组套管长度  $a_1 = 0.4a_2$ , 根据等效传输线理论计算结果, 应有  $V_{red1} = 0.5a_2$ 。由于计算参数与实验测量结果无法完全达到一致, 故这里采用比值的关系, 以消除不一致产生的影响。

在实验室内进行试验, 把小口径电磁随钻系统的发射信号端与室外浅孔内发射极连接, 信号经过土壤传播, 发射正极与钻杆连接, 再连接到接收仪的正极; 在约 100 m 的山上连接接收地线, 信号可以很好接收。发射与接收数据准确无误时, 检测接收波形, 测量信号电压。得到不同的电压信号如图 6 所示。图 6 中 (1) 和 (2) 分别对应外套管长度为  $a_1$  和  $a_2$ 。由检测电压比值可看出  $V_1/V_2 \approx 0.5$ 。与按等效传输线理论计算结果基本相符。

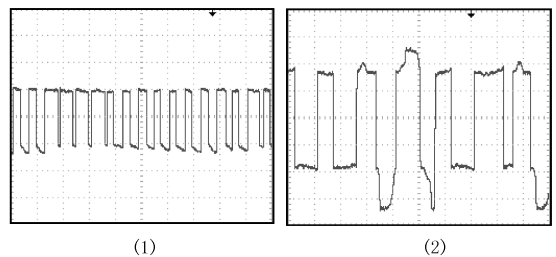


图 6 地面检测电压信号对比

表2 钻井液设计性能与实际性能对比

项目	井深 /m	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘 度/s	塑性粘度 /(Pa·s)	屈服值 /Pa	静切力 (10"/10')/Pa	失水量 /mL	泥饼厚 /mm	固相含量 (体积)/%	O/W(体积) /%	含砂量(体 积)/%	pH值(试 纸,仪表)
设计	4100	0.91~0.95	40~80	12~28	5~18	1.5~4.5/2.5~9	5~8	≤0.5	<12.0	30~70/70~30	<0.4	9~11
实际	4300	0.89~0.91	60~70	22~25	6.5~10	1.5~2.5/2~3	4.5~2.5	0.1	18	64~70/36~30	0.1~0.4	9

## 6 效果评价

(1)水包油钻井液有利于发现和保护油气层。本井四开欠平衡井段(3528~4344 m)设计最低密度0.91 g/cm<sup>3</sup>,3588 m发现第一个显示较好油气层时实际密度只有0.89 g/cm<sup>3</sup>,本井段共发现油气显示13层,有11层钻井液密度≤0.90 g/cm<sup>3</sup>。四开井段气层顶为3532 m,气层底为4371.5 m。本井3803.5 m点火成功,到4376.5 m完钻,实现全井段边喷边钻。通过本井钻探,证实松辽盆地东南隆起区十屋断陷后五家户构造深层营城组下部、沙河子组上部自生自储的原生油气藏极具油气勘探前景,为今后该地区布井和储量评估提供了有力的支持。

(2)水包油钻井液防塌效果好。本井泥砂岩地层欠平衡钻进井段比较长(816 m),在这期间没有发生井壁垮塌现象,12趟起下钻畅通无阻;四开井段平均井径235.97 mm,平均井径扩大率9.30%。

(3)机械钻速较三开有所提高。本井三开井段(1505~3528 m)共用钻头24只,平均机械钻速1.31 m/h;四开井段(3528~4371.5 m)共用钻头6只,平均机械钻速1.49 m/h。

(4)水包油钻井液配制简单,具有密度低、润滑性好、滤失量低、高温稳定性强等特点。机械除砂容

易,有害固相含量低,有利于油气层保护。

## 7 认识和建议

(1)水包油钻井液水相矿化度对粘度、切力影响较大,因此配浆前要对水进行分析,如果矿化度>5000 mg/L,应先进行水处理,再配制水包油钻井液。

(2)由于水包油钻井液属于无固相钻井液,屈服值偏低,所以选择高温增粘剂时应着重优选增加切力为主的高温助剂。

(3)水包油钻井液抗高温抗污染能力强,能有效防止水敏性地层坍塌掉块。

(4)该体系性能稳定,处理幅度小,维护处理前必须做好小型实验,确定药品加量,严格控制油水比例,防止因油水比例失调而造成破乳。

(5)由于水包油钻井液是一种正乳化钻井液体系,根据现场需要,提粘时使用PAMS-601高温增粘剂或在允许范围内增加油含量,提高粘切,降粘时加入低浓度FT-1和1-JXS胶液或在允许范围内增加水的含量。

(6)在四开欠平衡段,由于地层压力高,无法欠平衡钻进时,加重材料应选用可酸化的钛铁矿粉或超细碳酸钙,有利于保护气层。

(上接第17页)

## 5 结语

采用等效传输线法分析了发射极长度对地面电压的影响,计算数据和实测结果基本符合。在进行电磁波随钻测量传输特性分析时,还存在理论上的困难。需要进一步系统的从理论上对电磁随钻测量系统进行研究,甚至建立新的计算模型。

## 参考文献:

[1] Ivo Steiner. Electromagnetic MWD/LWD - Where and Why?,

Rud. - gepl. - naft. zb. [J]. Zagreb,1996,(8):123-128.

[2] 熊皓,胡斌杰.随钻测量电磁信道分析的等效传输线法[J].电波科学学报,1995,10(3):8-14.

[3] 刘修善,刘爱顺.电磁随钻测量技术谱新篇[N].中国石化报,2007-05-29(7).

[4] Louis Soulier, Michel Lemaitre. Geoservices S. A., E. M. MWD Data Transmission Status and Perspectives [J]. SPE/IADC 25686,1993:121-128.

[5] Poh Kheong Vong. David Rodger and Andrew Marshall, Modeling an electromagnetic telemetry system for signal transmission in oil fields[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,41(5):2008-2011.