

基于 ANSYS 的套管对 EM - MWD 信号传输的影响分析

邵 春, 付信信, 褚志伟

(中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:评价电磁波随钻测量(EM - MWD)信号传输效果,不可忽视套管对信号传输的影响,而套管对信号传输影响极为复杂,很难用数学模型进行全面分析。基于此,采用 ANSYS 有限元软件,对 EM - MWD 在套管中信号传输进行建模仿真,从地面电流密度及接收信号压差方面,分析套管对 EM - MWD 信号传输影响规律。仿真结果表明:绝缘短节出套管,套管对信号起引导作用,反之,套管对信号起屏蔽作用;低电阻率钻井液对 EM - MWD 在套管中的信号传输影响大。

关键词:电磁波随钻测量;信号传输;套管;钻井液;仿真

中图分类号:TE243;P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 7428(2015)12 - 0006 - 03

Analysis on the Influence Rule of Casing on EM - MWD Signal Transmission Based on ANSYS/SHAO Chun, FU Xin-xin, CHU Zhi-wei (Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The influence of casing can not be ignored for evaluating the transmission effect of EM - MWD signal, and it is difficult to analyze this effect with mathematical models because of the casing's extremely complicated effects. Therefore, modeling and stimulation of EM - MWD signal transmission in the casing were made by ANSYS finite element software to analyze the influence rule of casing on EM - MWD signal transmission in the aspects of ground current density and ground receiver voltage. The stimulation results show that the casing plays a guiding role to the signal when insulation nipple is out of the casing, and conversely, the casing has a shielding effect on the signal; low resistivity drilling fluid has a great influence on EM - MWD signal transmission in the casing.

Key words: electromagnetic measurement while drilling (EM - MWD); signal transmission; casing; drilling fluid; simulation

0 引言

在钻井施工中,电磁波随钻测量是实现井眼轨迹监测与控制的重要手段,国内随钻测量有 2 种:泥浆脉冲随钻测量系统与电磁波随钻测量系统(EM - MWD)^[1-2]。相对于泥浆脉冲随钻测量系统,EM - MWD 是通过发射电磁波进入地层来传输井下数据的,具有不受钻井液介质、排量大小限制的优点,但传输深度一般不超过 3500 m。地矿钻探施工多为小排量钻进,钻孔垂深一般不超过 3000 m,EM - MWD 在地矿钻探中具有广阔的应用前景。

目前 EM - MWD 信号传输规律被热点研究^[3-4]。电磁波信号传输不仅受到地质条件、井身结构、钻具结构的影响,而且受到套管的影响,正确认识这些影响因素与影响规律,有助于合理判别 EM - MWD 井下工况及设定合理的发射功率。对于 EM - MWD 在套管中的传播机理,文献[3]、文献

[5]基于“路”的原理,从理论上得出地面接收信号压降变化规律,但对地面电流密度未给予研究,此外也未涉及到钻井液电阻率的影响。地面接收信号强弱由接收信号压差大小与地面电流密度强弱共同体现。基于此,本文采用 ANSYS 有限元软件,对 EM - MWD 在套管中信号传输进行建模,模型中考虑钻井液电阻率因素,从地面电流密度和地面接收电压两个方面进行仿真分析,获得信号传输规律。

1 电磁波信道传输分析

EM - MWD 发射基本原理:钻柱在井底被绝缘短节隔成两段,分别作为信号发射两极,构成非对称偶极子激励方式。EM - MWD 传输信道的理论分析方法有 2 种:一种是基于“路”概念的等效传输线近似法^[5-6],另一种是求解场边值法^[7]。场与路在本质上应是一致的。等效传输线近似法较为容易获得

收稿日期:2015 - 10 - 23; 修回日期:2015 - 10 - 25

作者简介:邵春,男,汉族,1972 年生,副教授,副主任,地质工程专业,博士,从事教学及随钻测量技术研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号,shaochun_74@163.com。

求解结果,目前文献中大多数信道传输模型都是基于此方法以及其改进方法。相对于等效传输线法,场边值法对于复杂边界条件应用效果较好,但方程非常复杂,很难从理论上进行数值求解,不过可以基于其基本原理,利用有限元方法进行求解。在场边值法中,电流沿上部钻柱非等值分段进入地层,再从地层非等值分段流入下部钻具,形成电流回路。基于此原理,将上部钻柱和下部钻柱分别划成 n 段线性电流有限单元和 m 段线性有限单元,上部钻柱从下到上电流分布为 $I_{a1}, I_{a2} \cdots I_{an}$,流入地层电流分别为 $i_{a1}, i_{a2} \cdots i_{an}$,二者满足如下关系:

$$I_{ak} = \sum_k i_{ak} \quad k = 1, 2 \cdots n \quad (1)$$

下部钻柱从上到下电流分布为 $I_{b1}, I_{b2} \cdots I_{bm}$,流入地层电流分别为 $i_{b1}, i_{b2} \cdots i_{bm}$,二者满足如下关系:

$$I_{bk} = \sum_k i_{bk} \quad k = 1, 2 \cdots m \quad (2)$$

根据电路回路原理:

$$I_{a1} = I_{b1} \quad (3)$$

EM - MWD 信道原理图见图 1。

2 模型建立及边界条件分析

为便于建模,在有限元建模时做如下假设:(1)井眼为直井,井眼横截面呈圆形,钻柱轴线与套管轴线重合;(2)钻柱全部为钻杆;(3)地层为均质地层。

直井井眼和周围地层具有对称性,故研究模型选用平面对称模型(见图 2),二维坐标系原点定在井眼底部横切面中心位置。套管外径 244.5 mm、壁厚 11.05 mm;钻杆外径 127 mm、壁厚 12.7 mm;地层圆周半径 1800 m,地层深度 1812.5 m;绝缘短节长度 0.5 m、壁厚 12.7 mm,绝缘短节下部钻柱 12 m。

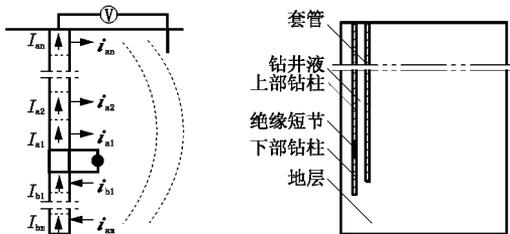


图 1 EM - MWD 信道原理图

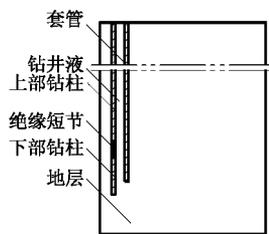


图 2 仿真模型示意图

模型 EM - MWD 信号发射频率为 2.5 Hz,发射功率为 5 W。模型的边界条件和载荷设置如下:将激励源正、负极分别加载在绝缘短节上部钻柱、下部钻柱上。模型计算参数如下:钻杆和套管电阻率为

$1 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$,地层电阻率为 $10 \Omega \cdot m$,绝缘短节电阻率为 $1 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$,钻井液电阻率为 $1 \Omega \cdot m$ 。

3 模型仿真分析

3.1 模型网格划分

在有限元仿真中,网格划分质量直接影响计算结果的精度和效率^[8],本模型中的套管壁厚、钻杆壁厚、钻杆内径、绝缘短节长度与钻柱长度、地层尺寸相差多个数量级,故采用映射网格划分和自由网格划分相结合逐级划分,具体网格划分方法如下:(1)对钻柱、套管、钻井液、绝缘短节边线按长度进行分段,然后进行映射网格,所划分四边形长宽比 $> 1: 10$;(2)将地层分为两个部分进行自由网格划分,单元为三角形:第一部分为距离钻柱 50 m 以内的地层,此部分为网格由密到疏过渡部分;第二部分为距离钻柱 50 m 处到地层边界之间的地层,此部分地层网格因远离钻柱故网格较稀。

3.2 模型求解及分析

在定义材料属性、建立几何模型、划分网格、加边界条件和载荷之后,直接对模型进行求解。

3.2.1 套管对地面接收信号的影响

图 3、图 4 分别为绝缘短节位于套管内深度 1200 m 时的地层电位云图和电流密度云图,由图中可以看出,信号主要集中在井眼附近,故取钻柱与地面电极水平间距为 50 m,其电压差为 ΔU_0 ,地面电极处电流密度为 J_0 。

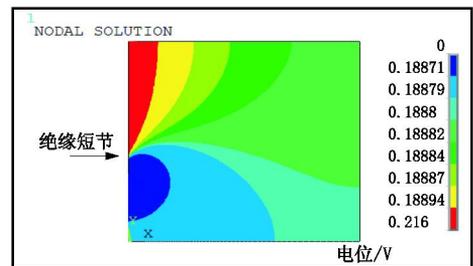


图 3 地层电位云图

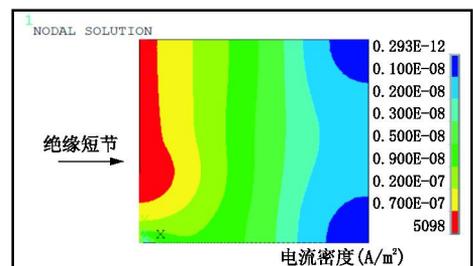


图 4 地层电流密度云图

图5为绝缘短节深度与地面接收电压的关系,纵坐标表示地面接收电压分贝值,即 $U(\text{dBV}) = 20\log(\Delta U_0)$ (以下若无特别说明接收电压均以分贝值表示)。图6为绝缘短节深度与地面电流密度的关系,纵坐标表示地面电流密度分贝值,即 $J[\text{dB}(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})] = 20\log(J_0)$ (以下若无特别说明,电流密度以分贝值表示)。由图5、图6可知:当绝缘短节在金属套管内时,相对裸眼井,地面接收电压与电流密度明显减弱,套管对信号呈现屏蔽作用;当绝缘短节出套管,地面接收电压与电流密度明显增大,套管对信号传输呈现引导作用。

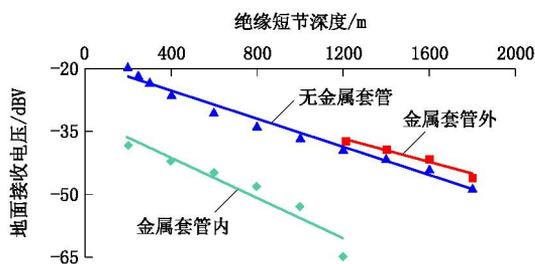


图5 绝缘短节深度与地面接收电压的关系

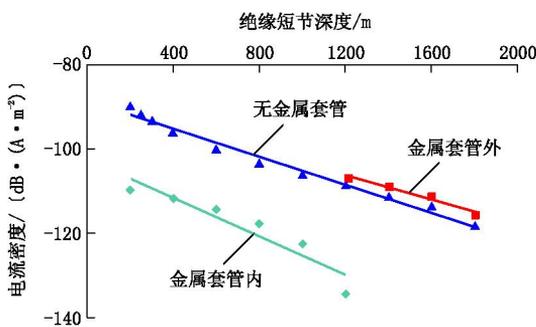


图6 绝缘短节深度与地面电流密度的关系

3.2.2 钻井液电阻率对地面接收信号的影响

图7为钻井液电阻率与地面接收电压的关系,图8为钻井液电阻率与地面电流密度关系,由图7、图8可知:裸眼井中,地面接收电压与电流密度变化基本不受电阻率变化的影响,电阻率对地面接收信号影响较小;当绝缘短节在金属套管中时,电阻率的变化对地面接收信号影响较为明显,随着钻井液电阻率减小,地面接收电压与电流密度呈减小趋势,当电阻率 $< 5 \Omega \cdot \text{m}$ 时,接收电压与电流密度随着钻井液电阻率减小迅速下降。

4 结论

建立井下EM-MWD信号传输有限元模型,基于此模型,对EM-MWD在套管中信号传输进行

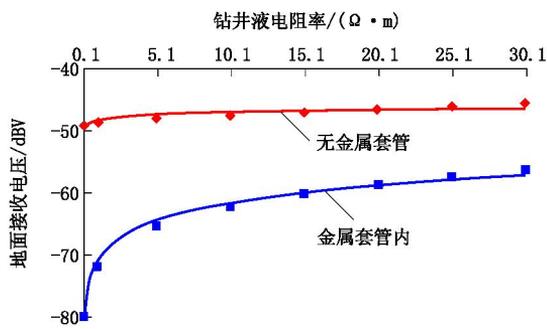


图7 钻井液电阻率与地面接收电压的关系

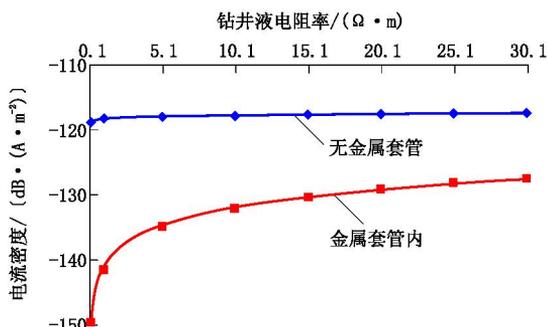


图8 钻井液电阻率与地面电流密度关系

仿真分析,得出如下基本规律。

(1) 绝缘短节处于套管中时,一部分信号被套管屏蔽,相对于裸眼地层,接收信号明显减弱。当绝缘短节出套管时,套管对信号呈现引导作用,信号明显加强。

(2) 绝缘短节处于套管中时,钻井液对电磁波信号传输影响不可忽视,尤其当钻井液电阻率 $< 5 \Omega \cdot \text{m}$,随着电阻率减小,地面接收信号强度迅速下降。

参考文献:

- [1] 张清. 深层钻探的电磁信息传输方式研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程). 2009, 36(10): 15-17, 20.
- [2] 卢春华, 雷晓岚, 于小龙, 等. $\varnothing 175 \text{ mm}$ 电磁随钻测量系统的研制及试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 63-67.
- [3] 范业活, 聂在平, 李天禄, 等. 随钻电磁波传输理论模型与信道特性分析[J]. 电波科学学报, 2013, 28(5): 909-914.
- [4] 刘修善, 侯绪田, 涂玉林, 等. 电磁随钻测量技术现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5): 4-9.
- [5] 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, 40(3): 8-14.
- [6] 刘章发. 随钻测量电磁传输信道的研究[D]. 新乡: 中国电波传播研究所. 1998.
- [7] LOVELL J R. Finite Element Methods in Resistivity Logging[M]. Ridgefield: Schlumberger Technology Corporation. 1993.
- [8] 邵春, 张熠, 潘秉锁, 等. 基于 ANSYS 的金刚石钻头钻进中孔底岩石的热交换研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(1): 11-14.