

地层对电磁随钻测量信号的影响研究

呼石磊，鄢泰宁，李 晓
(中国地质大学(武汉) 工程学院，湖北 武汉 430074)

摘要：为了改善电磁波随钻测量系统的信号传输的距离和质量，通过对电磁波在地层中传输特性的分析，研究了地层电导率、磁导率、电磁波发射频率和发射天线长度这4个方面对电磁波信号衰减和传输深度的影响。结果表明：电磁波传输距离随着发射频率减小而增大，高电阻率地层有利于电磁波的传输。当频率在5~20 Hz时，传输距离1 000~2 000 m时，强度信号较强，能很好地满足工程的需要，选用穿孔外接金属环套激励天线的效果最好，而且金属环长度应尽量长，而绝缘段长度为0.5 m时，发射天线的效果最佳。

关键词：随钻测量；电磁波；地层影响；传输深度计算；强度信号归一化；发射天线长度

中图分类号：P631.223 **文献标志码：**A **文章编号：**0253-2336(2011)09-0114-04

Study on Strata Affected to Electromagnetic with Drilling Measuring Signal

HU Shi-lei, YAN Tai-ning, LI Xiao

(School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the electromagnetic wave with the signal transmission distance and quantity of the drilling measuring system, with the analysis on the transmission features of the electromagnetic wave in the strata, the paper had a study on the electric conductance rate of the rock, magnetic conductance rate, the transmitting frequency of the electromagnetic wave and the length of transmitting antenna affected to the signal attenuation and transmission depth of the electromagnetic wave. The results showed that the transmission distance of the electromagnetic wave would be increased with the transmitting frequency reduced and the high electric resistance strata would be favorable for the transmission of the electromagnetic wave. When the frequency was 5~20 Hz and transmission distance was 1 000~2 000 m, the signal strength would be high and could meet the requirements of the engineering. The excitation antenna with the metal ring loop connected would have best effect, the length of the metal ring should be as long as possible. When the length of the insulation section was 0.5 m, the effect of the transmitting antenna would be best.

Key words: with drilling measurement; electromagnetic wave; strata influences; calculation of transmission depth; normalization of strength signal; length of transmitting antenna

为了追求高质量的钻探技术，受控定向钻井在钻探领域应用越来越广泛，随钻测量系统也随之快速发展起来，但在很多特殊情况下，传统的随钻测量系统已经不能满足钻探的要求，电磁波随钻测量研究随之迅速发展，但由于电磁波所特有的性质以及传播介质的影响，在研究中遇到了很多困难，地层介质中电磁波的信号损耗和传输深度是一个主要的方面。所以，这一方面成为研究电磁波随钻测量系统的一个重要方向。

1 电磁波在有损媒介中的传播原理

根据麦克斯韦方程，变化的电场产生磁场，变化的磁场也能产生电场，时变场源可以产生变化的电场和磁场，这里采用谐变磁偶极子的电磁场研究^[1]。麦克斯韦方程组的积分方程：

$$\oint_l H dl = \int_s (J + \frac{\partial D}{\partial t}) ds \quad (1)$$

式中：H为磁场强度，A/m；l为线电流长度，m；J为传导电流密度，A/m²；s为面积，m²；D为电

通量密度, C/m^2 ; t 为时间, s。

由式(1)积分可以得到:

$$\nabla \times H = J + \epsilon E \quad (2)$$

其中: ϵ 为介电常数; E 为电场强度, V/m 。而 $J = \sigma E$, 所以式(2)可以变换为

$$\nabla \times H = \sigma E + \epsilon E \quad (3)$$

其中, σ 为电导率, S/m 。由于传输过程中采用的是谐变电磁场, 考虑到正弦波的失真率小, 一般采用正弦波。所以式(3)可以用复数表示:

$$\nabla \times H = \sigma E + j\omega \epsilon E \quad (4)$$

式中, ω 为角速度, rad/s 。

令 $\epsilon_k = \epsilon + \sigma/j\omega$, 式(4)可变换为

$$\nabla \times H = j\omega \epsilon_k E \quad (5)$$

又令 $k = \alpha - j\beta$, 其中: k 为传播常数; α 为衰减系数; β 为相位常数。传播因数 k 与复电容率 ϵ_k 的关系为 $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon_k$, 则

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \sigma = \alpha^2 - \beta^2 - 2j\alpha\beta \quad (6)$$

式中, μ 为磁导率, H/m 。

令式(6)实部与虚部对应相等得

$$\omega^2 \mu \epsilon = \alpha^2 - \beta^2 \quad (7)$$

$$\omega \mu \sigma = 2\alpha\beta \quad (8)$$

联立方程组解得

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right] \quad (9)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right] \quad (10)$$

在高有损媒介中, $\sigma \gg \omega \epsilon$, 这样的媒介称为良导体, 所以

$$\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\omega \mu \sigma / 2} \quad (11)$$

工程上用趋肤效应深度 δ 来描述电磁波的传播距离:

$$\delta = 1/\alpha \approx 1/\beta = \sqrt{2/(\omega \mu \sigma)} \quad (12)$$

将角速度用频率替换, 式(12)可转化为

$$\delta = 1/\alpha \approx 1/\beta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)} \quad (13)$$

式中: δ 为趋肤深度, m; f 为频率, Hz。

2 地层对电磁波传播的影响分析

在实际钻探过程中, 随钻测量系统在地层中发射的电磁波信号通常要穿越多个地层, 不同地层的特性都不一样, 表1是钻探过程中常遇地层的电磁参数^[2~6]。

表1 地层电磁参数

介质	相对介电常数 ϵ_r	电导率 $\sigma / (10^{-3} S \cdot m^{-1})$
空气	1	0
地下水	80	1.00 ~ 40.00
干砂	3 ~ 5	0.01
湿砂	20 ~ 30	0.10 ~ 1.00
灰岩	4 ~ 8	0.50 ~ 2.00
页岩	5 ~ 15	1.00 ~ 100.00
淤泥	5 ~ 30	1.00 ~ 100.00
黏土	5 ~ 40	2.00 ~ 1 000.00
花岗岩	4 ~ 6	0.01 ~ 1.00

2.1 地层对传输深度的影响

由趋肤效应公式可知, 电磁波在地层中传输的距离主要由电导率、磁导率和频率决定, 但在钻探过程中, 绝大多数的地层均具有抗磁性和顺磁性, 磁化率基本为0, 所以磁导率可以确定为真空磁导率, 为 $4 \times 10^{-7} \pi H/m$ 。通过分析趋肤效应公式可得出如图1所示的关系。

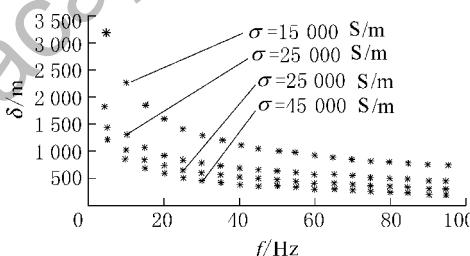


图1 不同电导率下传输距离与频率的关系

由图1可以清楚地得出, 电导率越低, 趋肤深度越大, 电磁波在地层中传输的距离越远, 然而在频率变化中, 频率越低电磁波传输的距离越远, 而且频率在5~40 Hz 传输距离变化最大, 在5~20 Hz, 信号传输的距离基本都在1 000 m以上, 基本满足钻探中监测的要求, 所以在随钻测量系统中, 采用甚低频发射信号最合适。

2.2 地层对信号强度的影响

在信号传输过程中, 信号会被地层介质吸收, 所以传输距离越远, 信号强度随之减弱, 可以通过强度信号归一化来分析信号衰减的规律。地层中某点的磁场强度 H_x 为

$$H_x = H_0 \exp(-\beta r) \quad (14)$$

式中: H_x 为被测点的磁场强度, A/m ; r 为源点到场点的距离, m; H_0 为源点磁场强度, A/m 。

将式(14)变换可得

$$H_x/H_0 = \exp(-\beta r) \quad (15)$$

H_x/H_0 在电磁波研究中称为强度信号归一化。

其中， $\beta \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ 。根据表1可知，在钻探过程中，经常遇到的地层的电导率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \text{ S/m}$ ，而考虑发射信号采用甚低频时，频率在 $5 \sim 20 \text{ Hz}$ ，所以可以计算出 β 为 $1.38 \times 10^{-5} \sim 8.88 \times 10^{-3}$ 。按照正常情况考虑，现在所钻井中井深一般在 5000 m 以内，所以可取 r 为 5000 m 。综合考虑相位常数和传播距离的影响，被测场点的强度信号归一化关系曲线如图2所示。

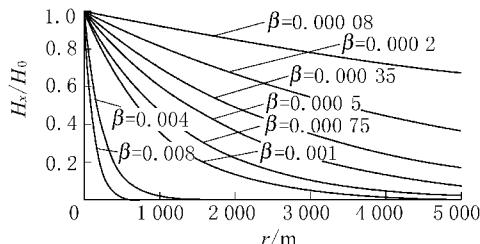


图2 不同相位常数下距离与强度信号归一化的关系

由图2可知，随着相位常数的增大，强度信号归一化在传播距离上衰减越快，传播距离 $1000 \sim 2000 \text{ m}$ 时， β 值在 $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ ，强度信号归一化值较大，信号衰减较少，所以随钻测量系统应该把发射频率限定在此范围内比较合理。

然而，在实际的钻进过程中，一般要穿过多个具有不同地层参数的地层，对强度信号归一化进行综合考虑，可以得出叠加公式为

$$H_n/H_0 = \exp\left(-\sum_{i=0}^n \beta_i r_i\right) \quad (16)$$

式中： H_n 为第 n 地层某场点的磁场强度， A/m ； β_i 为第 i 个地层中的相位常数； r_i 为电磁波在第 i 个地层中传输的距离， m 。

通过这个公式，可以计算出电磁波信号在穿越了 n 个地层后信号的强度。

3 甚低频信号发射天线影响因素分析

在甚低频信号发射天线选择中，有电性天线和磁性天线，当两者的输入功率相等时，通信效率之比 p 为^[3]

$$p \approx c/(0.424L) \quad (17)$$

式中： c 为磁性天线的半径， m ； L 为电性天线的长度， m 。

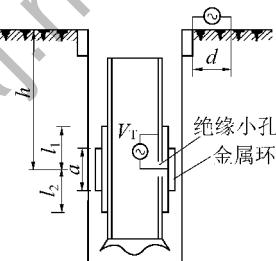
考虑到钻井中井径有限而深度比较深的实况，

应该选择电性天线，即采用垂直电激励的方式传输信号^[4-7]。垂直电激励方式天线发射的功率主要与天线长度、结构、工作频率等有关，频率在上面已经讨论，这里讨论天线长度 l_3 和结构的影响。天线的平均辐射功率 P_T 由下式确定^[5-8]：

$$P_T = \frac{\pi}{3} \eta |I_0|^2 \left(\frac{l_3}{\lambda}\right)^2 \quad (18)$$

式中： η 为波阻抗， $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon} = k/(\omega\epsilon)$ ， Ω ； λ 为波长， m ； I_0 为天线输入端电流， A 。

从式(18)中可知，发射功率与天线长度 l 的平方成正比，所以在使用中天线应该尽量长。垂直电流激励及其等效传输模型采用穿孔外接金属环套激励法激励轴向电流。该装置的模型如图3所示，即将钻杆内激励器一端接至钻杆内壁，另一端通过外壁的绝缘小孔，与钻杆外包裹的金属环相接。



l_1 —钻杆绝缘段上部长； l_2 —钻杆绝缘段下部长； a —金属环套长

图3 垂直电流激励模型

在距离井口 d 处的位置上埋一接地电极，当这个距离远小于发射源到地面的深度 h 时，即满足条件 $d \ll h$ ，井口套管与电极间的电位差为

$$V_r(h, d) \approx 2I_1 Z_{01}(h) \frac{\ln(d/b_1)}{\ln(\pi h/4b_1)} \times \exp\left[-\int_{l_1}^h \gamma_1(z) dz\right] \quad (19)$$

地面检测到的电压分贝值为

$$V_{rec} = 20 \lg [V_r(h, d) / V_T] \quad (20)$$

其中： $V_r(h, d)$ 为实际的电压值， V ； V_{rec} 为地面显示仪电压值， V ； I_1 为上部钻杆的输入电流， A ； $\gamma_1(z)$ 为传播因子传播系数； $Z_{01}(h)$ 为特性阻抗； b_1 为外半径， m ； h 为地面至激励点的深度， m ； l_1 为钻杆绝缘段上半部分长度， m ； V_T 为激励电压， V 。根据式(20)讨论发射天线的影响因素。钻杆壁厚 0.01 m ，地层电阻率 $25 \Omega \cdot \text{m}$ ， l_1 为 1.5 m ，地面至激励点深 600 m ，频率 10 Hz ，在此条件下，不同金属环长度 a 和绝缘长度 l_1 对天

线信号强度(电压)的影响如图4和图5所示。

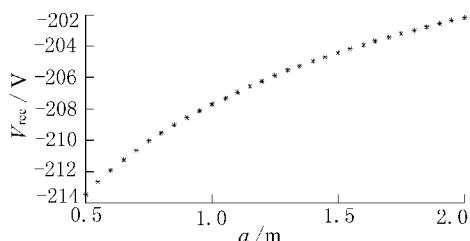


图4 检测电压与金属环R的长度a的关系曲线

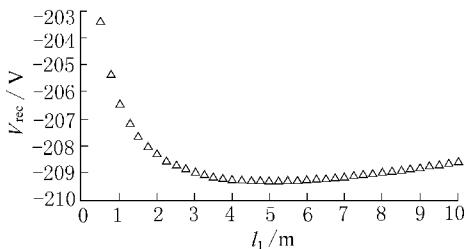


图5 检测电压与绝缘长度l₁的关系曲线

金属环的长度a的影响主要是使上部钻杆的输入电流发生变化，金属环长度a长度对信号影响较大，在所计算范围内，随长度增加检测电压信号增强。随绝缘段长度l₁增大，检测电压先减小再增大且减小的速度比增大的速度要快得多，但绝缘段长度对检测电压影响幅度整体不大。在计算数据范围内，l₁≈0.5 m时，检测电压达最大值。

4 结 论

用电磁波传输信号时，传输距离随频率降低而增加，所以应采用甚低频，一般为5~20 Hz时最好，这样传输距离在1 000~2 000 m时，强度信号归一化值在0.4~0.7，信号损耗比较小。在甚低

(上接第72页)

限公司旧方案需3 d，6个班；新方案为1.5 d，3个班)，减少了人员和设备的投入，相应增加了生产时间，施工的直接成本大幅降低。

每一个提升系统都有它的特点，其提升绳的更换方案不可千篇一律，它会受到井口设施、井口房结构、现场环境和设备状况等因素的影响，也可以说一个施工方案的确定是对提升系统结构、现场环境、设备状况及安全性综合评估的结论。

参考文献：

- [1] 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程 [M]. 北京: 煤炭工

业出版社, 2004.

频发射中，地面检测电压随天线的金属环长度a增大而增大，所以应尽量使金属环长度最长，绝缘段长度l₁应该设置为0.5 m，这样信号传输能力最强。电磁波在地层中传播的距离还受到地层电导率的影响。在钻探过程中常遇地层的电导率比较小，对电磁波的传播影响不大，但页岩、黏土和淤泥对电磁波的传播影响较大，所以地面接收信号天线应尽量埋入淤泥以下，可以考虑在下导管固井时将天线安装在导管最下端，或者研究新的接收天线装置来克服高电导率地层，这也是笔者下一步研究的方向。利用文中总结的叠加公式可根据邻井的地层参数计算电磁波在该区域能传播的有效距离，并确定在钻杆上安装信号放大器的间距。

参考文献：

- [1] 丁君. 工程电磁场与电磁波 [M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 203~205.
- [2] 徐涛. 水平定向钻进随钻测量方法及定位技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海冶金研究所, 2000: 77~79.
- [3] 陶晋宜. 甚低频电磁波穿透地层无线通信系统天线装置的研究 [J]. 太原理工大学学报, 1999, 30 (2): 141~142.
- [4] 熊皓, 胡斌杰. 随钻测量电磁传输信道研究 [J]. 地球物理学报, 1997, 40 (3): 3~4.
- [5] 潘仲英. 电磁波、天线与电波传播 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 262~265.
- [6] 黄麟森, 曾来. 煤矿井下定向钻进新技术 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (4): 94~99.
- [7] 叶根飞. 直径73 mm弯外管螺杆钻具近水平定向钻进试验 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (4): 47~51.
- [8] 李晓, 姚爱国, 李运升. 新型电磁随钻测量系统信道传输特性研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38 (2): 77~83.

- [1] 孔祥惠, 许红波, 王学勤, 等. 主井提升系统的综合技术改造 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (4): 9~10.
- [2] 翟红. 变频调速技术在矿井提升系统中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2006, 34 (5): 15~18.
- [3] 袁江峰, 陈锋. 浅析摩擦式提升机钢丝绳更换工艺 [J]. 煤炭科技, 2010, 38 (9): 24~25.
- [4] 胡成名, 肖兴明, 王美娜, 等. 摩擦提升机防滑装置的设计 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36 (4): 24~26.
- [5] 杨兆建, 贾昌喜, 王勤贤, 等. 多绳提升机钢丝绳张力动态测试调整研究 [J]. 煤炭科学技术, 1995, 23 (10): 12~14.