

电磁随钻测量的电激励模式的分析

王卫延 张守融

(中国科学院电子学研究所,北京)

摘要 本文提出一种电磁随钻测量的电激励模式的分析方法。这一方法可计算电磁随钻测量研究中的重要参数,如地面信号场强分布规律及其与工作频率的依赖关系,发射机构的输入阻抗等,从而为随钻测量系统的总体设计提供基本的依据。用这一方法对试验模型和现场试验进行的计算与试验结果很好符合。

关键词 电磁随钻测量,电磁散射,电激励模式

一、引言

在石油钻探和其它深井钻探工程中,如果在实施钻探的同时,能够随时了解井下温度、压力、扭矩等重要参数,对提高钻探的成功率,减少事故发生,具有十分重要的意义。实现这种设想的途径之一,是用电磁方法把井下信息传递到地面。具体的做法是把传感器放置在钻杆中,随钻带入井下;传感器采集到的有关数据被转换成电磁信号,加到钻杆绝缘段的两端,如图 1 所示的 A 、 B 两点;电磁信号通过地层向地面传播,然后由地上设备接收。我们把这种电磁随钻测量方法称为电激励模式。

由于井下地层深处情况十分复杂,信号衰减严重,而且井下设备又受到种种困难条件限制,发射功率很有限,致使经地层传输到地面的信号十分微弱。因此采用电激励模式实现随钻测量的首要问题,是研究在一定信号电压激励下,地面的信号场强分布,以确定在地面接收和测检信号的可能性。

近 30 年来,国内外对这一问题做了大量工作,但并没有得到分析地面场强分布的有效方法,也没有掌握地面场强的分布规律,这是电激励方法至今未获成功的原因之一。

基于介质体散射理论和导体边界条件,本文提出一种在确定的信号电压和地层环境下,分析电磁随钻测量的电激励模式的方法。应用这种方法,我们进行了大量计算,得到了地面场强分布规律,地面场强对工作频率的依赖关系,以及天线输入阻抗与地层参数的关系等。已进行的室内模拟试验和室外 30m 浅井试验的结果,与上述计算的结果很好符合。这说明本文提出的方法能够对电磁随钻测量的电激励模式进行有效的研究,能为随钻测量系统的总体设计提供最基本的数据。

二、物理模型和数学方法

本问题研究的物理模型如图 1 所示。这里地层被假设是水平分层。(本文提出的方法可以处理更复杂的地层结构。)图中钻杆下部画斜线的部份是绝缘段, 它把钻杆分成两部分。值得注意的是钻杆浸泡在泥浆之中, 与泥浆直接接触。通常泥浆的电导率很大, 与周围地层的电参数相差甚远。当 A 、 B 两点间受到频率为 f 的信号电压 V_0 激励时, 钻杆、钻杆周围的泥浆以及地层中都会有电流存在, 它们互相耦合, 共同决定钻杆上的电流分布和地层中的电磁场分布。在钻杆以外的区域, 有泥浆层、泥浆渗透层和原始地层。这些区域的电参数都是坐标的函数, 设电导率为 $\sigma(\mathbf{r})$, 相对介电常数为 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ 。为简单起见, 假定这些区域的磁导率就是真空磁导率 μ_0 。

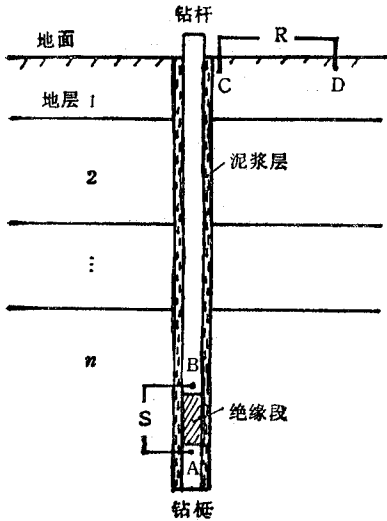


图 1 电磁随钻测量的电激励模式

1. 根据介质体的电磁散射理论, 在泥浆和地层中电场 $E(\mathbf{r})$ 可以表示为

$$E(\mathbf{r}) = \int_{\nu} i\omega\mu_0 \bar{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot J_c(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \int_a i\omega\mu_0 \bar{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot J(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (1)$$

式中 $\bar{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 是并矢 Green 函数, 它定义为

$$\bar{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\bar{I} + \nabla\nabla/k_0^2) e^{ik_0 R} / (4\pi R) \quad (2)$$

\bar{I} 是单位张量, k_0 是自由空间波数, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ 是场点与源点间的距离。 $J_c(\mathbf{r}')$ 是泥浆和地层中的等效电流, 定义为:

$$J_c(\mathbf{r}) = \tau(\mathbf{r}) E(\mathbf{r}) \quad (3)$$

$$\tau(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) - i\omega\epsilon_0(\epsilon_r(\mathbf{r}) - 1) \quad (4)$$

$J(\mathbf{r})$ 是钻杆上的电流。 ν 表示泥浆和地层所在的区域, a 表示钻杆所在的区域。

由于(1)式中第一个积分包含有 \mathbf{r} 点, 这个积分不收敛, 这是因为 \mathbf{r} 点是 Green 函数 $\bar{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 的奇点。所以它应改写为^[1,2]

$$\int_{\nu} i\omega\mu_0 \bar{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot J_c(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' = \text{P.V.} \int_{\nu} i\omega\mu_0 G_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot J_c(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' - iJ_c(\mathbf{r}) / (3\omega\epsilon_0) \quad (5)$$

符号 P. V. 表示排除 \mathbf{r} 点周围一个球形小体积以后的主值积分。把(5)式代入(1)式, 得到

$$[1 + i\tau(r)/(3\omega\epsilon_0)]\mathbf{E}(r) - P V \int_v i\omega\mu_0\tau(r')\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r},\mathbf{r}') \cdot \mathbf{E}(r')d\mathbf{r}' - \int_a i\omega\mu_0\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r},\mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(r')d\mathbf{r}' = 0 \tag{6}$$

2. 与通常的电磁散射问题不同的是,本模型中作为天线的钻杆是置于泥浆之中,泥浆又与周围地层直接接触。因此在泥浆中和地层中的电流除了有由辐射而产生的感应电流外,还有由直接传导而产生的电流。事实上当工作频率较低时,由传导产生的电流是实际存在电流的主要部分。在天线表面应用积分形式的 Maxwell 方程:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_s i\omega\mu_0\mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} \tag{7}$$

由于物理模型是轴对称的,在圆柱坐标系下,钻杆以外的区域中电场只有沿钻杆轴向的垂直分量 $E_z(\mathbf{r})$ 和径向分量 $E_\rho(\mathbf{r})$, 由(7)式可以容易地推导出

$$\begin{aligned} \oint_c \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l} = & \frac{i\omega\mu_0}{4\pi} \int_s \int_a \frac{\rho}{R^3} (1 - ik_0R)e^{ik_0R} I(z') dz' dS \\ & + \frac{i\omega\mu_0}{4\pi} \int_s \int_v \frac{1}{R^3} (ik_0R - 1)e^{ik_0R} [(z - z')\tau(r')E_\rho(r') \\ & - (\rho - \rho' \cos(\theta - \theta'))\tau(r')E_z(r')] d\mathbf{r}' dS \end{aligned} \tag{8}$$

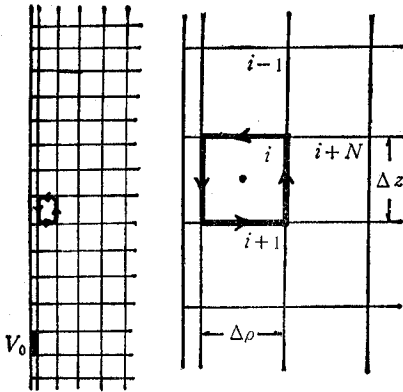


图 2 离散的模型和积分回路

其中 \int_a 表示沿钻杆的积分; c 表示部分沿天线表面的任意闭合曲线; S 是 c 所包围的面积; (z, ρ, θ) 和 (z', ρ', θ') 分别是场点和源点在圆柱坐标系中的坐标。

3. 应用数值方法联合求解方程(6)和(8)式,即可得到在一定激励电压下,钻杆上的电流分布和泥浆和地层中的电场分布。在数值计算中,把天线和地层离散为小单元,最简单的方法是把每个单元的场量看作是均匀的,对于离散后的模型,(8)式左端的积分是在图2所示的闭合回路上进行的,考虑到导体表面的边界条件和天线的激励

条件,它进一步可以表示为

$$\oint_{c_i} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \begin{cases} (E_\rho(i+1)\Delta\rho - E_\rho(i-1)\Delta\rho - E_z(i)\Delta z - E_z(i+N)\Delta z)/2 & \text{积分回路经过导体表面} \\ (E_\rho(i+1)\Delta\rho - E_\rho(i-1)\Delta\rho - E_z(i)\Delta z - E_z(i+N)\Delta z)/2 - V_0 & \text{积分回路经过天线激励区} \end{cases} \tag{9}$$

在计算中,考虑到在较远的区域场强和等效电流已相当微弱,故可以忽略。所以整个计算将在有限的区域内进行。

二、物理模型和数学方法

本问题研究的物理模型如图 1 所示。这里地层被假设是水平分层。(本文提出的方法

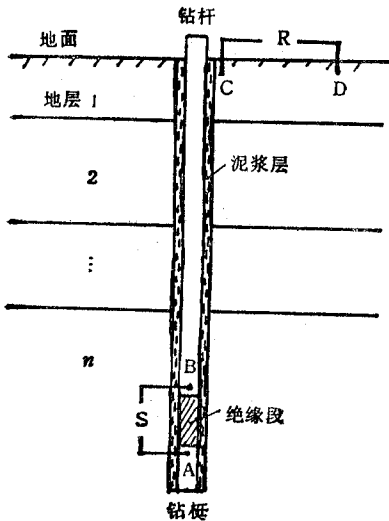


图 1 电磁随钻测量的电激励模式

可以处理更复杂的地层结构。)图中钻杆下部画斜线的部份是绝缘段, 它把钻杆分成两部分。值得注意的是钻杆浸泡在泥浆之中, 与泥浆直接接触。通常泥浆的电导率很大, 与周围地层的电参数相差甚远。当 A、B 两点间受到频率为 f 的信号电压 V_0 激励时, 钻杆、钻杆周围的泥浆以及地层中都会有电流存在, 它们互相耦合, 共同决定钻杆上的电流分布和地层中的电磁场分布。在钻杆以外的区域, 有泥浆层、泥浆渗透层和原始地层。这些区域的电参数都是坐标的函数, 设电导率为 $\sigma(\mathbf{r})$, 相对介电常数为 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ 。为简单起见, 假定这些区域的磁导率就是真空磁导率 μ_0 。

1. 根据介质体的电磁散射理论, 在泥浆和地层中电场 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 可以表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \int_v i\omega\mu_0\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}_e(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' + \int_a i\omega\mu_0\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (1)$$

式中 $\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 是并矢 Green 函数, 它定义为

$$\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\bar{\mathbf{I}} + \nabla\nabla/k_0^2)e^{ik_0R}/(4\pi R) \quad (2)$$

$\bar{\mathbf{I}}$ 是单位张量, k_0 是自由空间波数, $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ 是场点与源点间的距离。 $\mathbf{J}_e(\mathbf{r}')$ 是泥浆和地层中的等效电流, 定义为:

$$\mathbf{J}_e(\mathbf{r}) = \tau(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

$$\tau(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r}) - i\omega\epsilon_0(\epsilon_r(\mathbf{r}) - 1) \quad (4)$$

$\mathbf{J}(\mathbf{r})$ 是钻杆上的电流。 v 表示泥浆和地层所在的区域, a 表示钻杆所在的区域。

由于(1)式中第一个积分包含有 \mathbf{r} 点, 这个积分不收敛, 这是因为 \mathbf{r} 点是 Green 函数 $\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 的奇点。所以它应改写为^[1,2]

$$\int_v i\omega\mu_0\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}_e(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' = \text{P.V.} \int_v i\omega\mu_0\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}_e(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' - i\mathbf{J}_e(\mathbf{r})/(3\omega\epsilon_0) \quad (5)$$

符号 P. V. 表示排除 \mathbf{r} 点周围一个球形小体积以后的主值积分。把(5)式代入(1)式, 得到

$$[1 + i\tau(\mathbf{r})/(3\omega\epsilon_0)]\mathbf{E}(\mathbf{r}) - \text{P V} \int_p i\omega\mu_0\tau(\mathbf{r}')\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r},\mathbf{r}') \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}')d\mathbf{r}' - \int_a i\omega\mu_0\bar{\mathbf{G}}_0(\mathbf{r},\mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}')d\mathbf{r}' = 0 \tag{6}$$

2. 与通常的电磁散射问题不同的是,本模型中作为天线的钻杆是置于泥浆之中,泥浆又与周围地层直接接触。因此在泥浆中和地层中的电流除了有由辐射而产生的感应电流外,还有由直接传导而产生的电流。事实上当工作频率较低时,由传导产生的电流是实际存在电流的主要部分。在天线表面应用积分形式的 Maxwell 方程:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_s i\omega\mu_0\mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} \tag{7}$$

由于物理模型是轴对称的,在圆柱坐标系下,钻杆以外的区域中电场只有沿钻杆轴向的垂直分量 $E_z(\mathbf{r})$ 和径向分量 $E_\rho(\mathbf{r})$, 由(7)式可以容易地推导出

$$\begin{aligned} \oint_c \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l} = & \frac{i\omega\mu_0}{4\pi} \int_s \int_a \frac{\rho}{R^3} (1 - ik_0R)e^{ik_0R} I(z') dz' dS \\ & + \frac{i\omega\mu_0}{4\pi} \int_s \int_a \frac{1}{R^3} (ik_0R - 1)e^{ik_0R} [(z - z')\tau(\mathbf{r}')E_\rho(\mathbf{r}') \\ & - (\rho - \rho' \cos(\theta - \theta'))\tau(\mathbf{r}')E_z(\mathbf{r}')] d\mathbf{r}' dS \end{aligned} \tag{8}$$

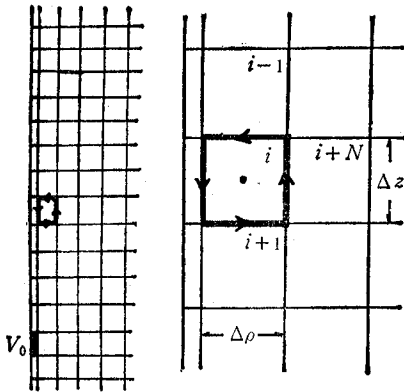


图 2 离散模型和积分回路

其中 \int_a 表示沿钻杆的积分; c 表示部分沿天线表面的任意闭合曲线; S 是 c 所包围的面积; (z, ρ, θ) 和 (z', ρ', θ') 分别是场点和源点在圆柱坐标系中的坐标。

3. 应用数值方法联合求解方程(6)和(8)式,即可得到在一定激励电压下,钻杆上的电流分布和泥浆和地层中的电场分布。在数值计算中,把天线和地层离散为小单元,最简单的方法是把每个单元的场量看作是均匀的。对于离散后的模型,(8)式左端的积分是在图2所示的闭合回路上进行的,考虑到导体表面的边界条件和天线的激励

条件,它进一步可以表示为

$$\oint_{c_i} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \begin{cases} (E_\rho(i+1)\Delta\rho - E_\rho(i-1)\Delta\rho - E_z(i)\Delta z - E_z(i+N)\Delta z)/2 & \text{积分回路经过导体表面} \\ (E_\rho(i+1)\Delta\rho - E_\rho(i-1)\Delta\rho - E_z(i)\Delta z - E_z(i+N)\Delta z)/2 - V_0 & \text{积分回路经过天线激励区} \end{cases} \tag{9}$$

在计算中,考虑到在较远的区域场强和等效电流已相当微弱,故可以忽略。所以整个计算将在有限的区域内进行。

三、计算结果

1. 室内模拟试验^[3]

为了检验提出方法的正确性,首先对模拟钻探的简化室内模型做了计算,结果与实验符合很好。室内试验是在一个充满水的有机玻璃水槽中进行的。水槽的长、宽、高各为 1m。钻杆是用浸入水中的中空铜管模拟的,铜管直径为 1cm 它被一长为 4cm 的绝缘段分为两段:上段长 64 cm,下段长 4 cm (参看图 1)。槽中水的电导率是 $0.075\Omega/\text{m}$ 。计算结果绘于图 3 和图 4。图 3 中的曲线表示距模拟钻杆 2cm 处水中电场水平分量沿深度的分布。试验中工作频率为 1MHz,激励电压为 1V。计算得到的钻杆输入阻抗为 143Ω ,与实验一致。图 4 表示水面电场水平分量沿径向距离的分布,工作频率为 1kHz,激励电压为 1V,绝缘段长度为 2cm,两段铜管长度不变。

计算分析和实验结果都指出,水面电场强度随径向距离增加而单调减小,不存在距钻杆一定距离处出现强峰的现象。

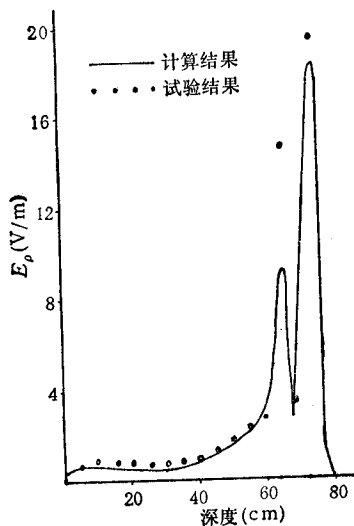


图 3 室内试验模型中距模拟钻杆 2cm 处水中电场水平分量沿深度的分布

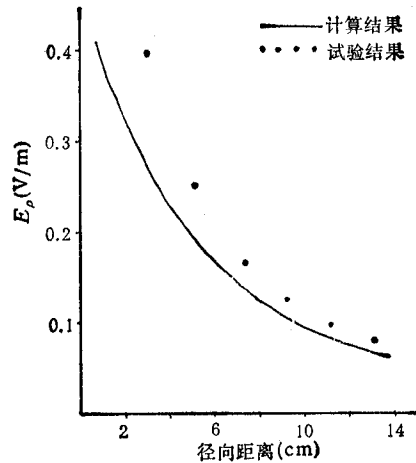


图 4 室内试验模型中水面电场水平分量沿径向距离的分布

2. 30m 浅井试验^[4]

为了进一步检验本文提出方法的正确性,并研究电磁随钻测量的一般规律,我们又计算了 30m 浅井试验的模型。试验井附近的地质环境如下:地面到地下 5m 之间 $\sigma = 0.02\Omega/\text{m}$; 地下 5m 到 23m 之间, $\sigma = 0.002\Omega/\text{m}$; 地下 23m 以下, $\sigma = 0.02\Omega/\text{m}$ 。井中泥浆层厚度约为 0.11m,电导率为 $1.0\Omega/\text{m}$ 。钻杆的直径为 6cm,长度为 1m。绝缘段的长度为 2m。工作频率为 25 Hz—5 kHz,激励电压为 1V。图 5 给出了地表电场沿径向距离分布的计算结果和试验结果。试验中测得的数据与计算值基本符合。计算得到的钻杆输入阻抗是 26.1Ω ,与试验结果一致。

运用上述计算方法，我们进一步分析了地面场强与工作频率之间的关系。大量计算结果表明，地面场强分布与工作频率有关，但在包括零频在内的低频段，有一个稳定的频率区间。在此区间内，地面场强几乎与频率无关，而当工作频率高于这个区间后，地面场强将随频率增高而迅速减小。浅井试验的结果与上述结论一致。试验中使用了 25Hz 至 5kHz 的工作频率。在这一频率区间内，测得的地面场强几乎没有变化。由于实验设备的限制，未进行 5kHz 以上的试验。

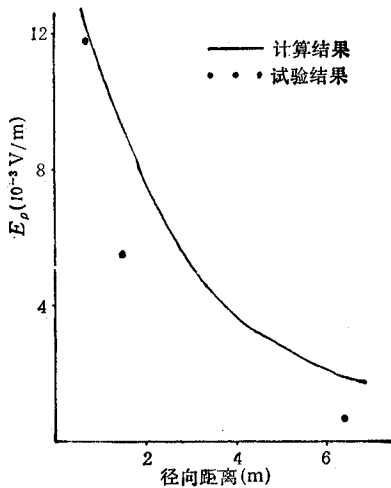


图 5 30m 浅井试验中地表电场沿钻杆径向距离的分布

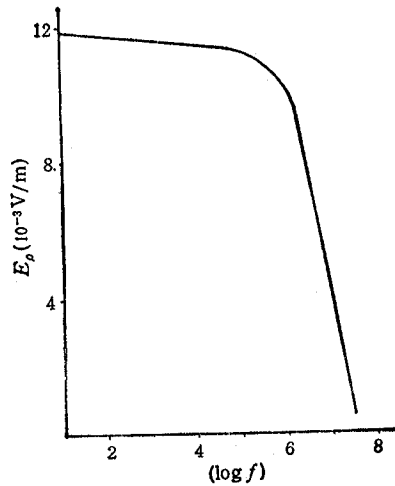


图 6 地面场强与工作频率的关系

图 6 所示为计算得到的 30m 浅井试验中，地面场强与工作频率的关系。图中曲线表示在不同工作频率下，距钻杆 1m 处地面场强的水平分量。

3. 深井的计算

使用上述方法，我们以某油井为背景，做了深井模型计算。这口油井的地质条件如下：

地面至地下 800 m 之间 $\sigma = 0.125 \Omega/m$ ；地下 800m 至 1400m 之间， $\sigma = 0.2\Omega/m$ ；地下 1400 m 至 2300m 之间， $\sigma = 0.5\Omega/m$ ；2300m 以下 $\sigma = 0.2\Omega/m$ ；井中泥浆及其渗透层厚为 0.55 m；电导率为 $8.0\Omega/m$ 。钻挺直径为 20cm。绝缘段长度为 5m。工作频率为 20Hz。激励电压为 1V。图 7 是当钻挺分别下到 800m, 1500m 和 3000m 不同深度时，地面的电场强度分布的计算结果。

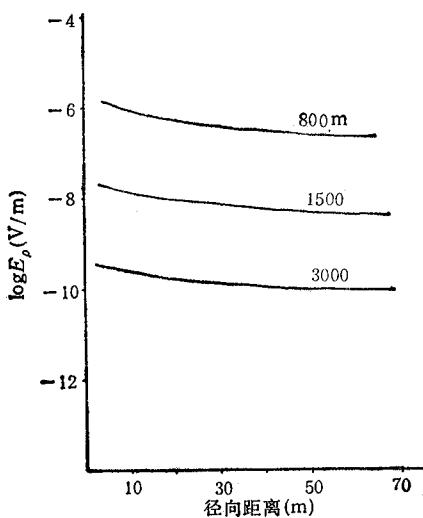


图 7 发射机构在不同深度时地面的电场分布

计算结果表明，对于本例相当恶劣的地质和泥浆环境，在 1V 电压的激励下，地面电场强度仅有 1nV/m。考虑到地面噪声的影响，这样微弱的信号是难于接收和处理的。不过如果地层和泥浆条件较好，地面信号电场强度可大大提高。例如当地层电导率是 $0.02 \Omega/m$ ，泥浆电导率是 $1 \Omega/m$ ，仍以 1V 信号电压激励，则地面电场强度可达到数十 nV/m。值得注意的是，泥浆

仍以 1V 信号电压激励，则地面电场强度可达到数十 nV/m。值得注意的是，泥浆

和地层条件不仅影响到地面电场强度,还直接影响到作为发射装置的钻杆的输入阻抗。在上述深井模型的泥浆和地质条件下,当钻杆下到 3000m 时,输入阻抗仅为 0.5Ω 左右,这样低的输入阻抗使设计和制造发射设备很困难。

四、结 论

按照本文提出的电激励模式的分析方法,我们进行了大量计算。对这些计算结果分析之后,对采用电激励模式实现电磁随钻测量有以下初步结论。

(1) 地面场强随径向距离增加而单调下降,即在水平方向无不均匀结构的地质条件下,距钻杆越近场强越强,越远场强越弱。

(2) 地面电场强度与钻杆附近,特别是激励区附近的泥浆和地层的电参数有密切关系。泥浆和地层电导率增大,泥浆渗透层增厚等,都是导致地面电场强度下降的重要原因。

(3) 当工作频率处于低频稳定区内,电场强度几乎不随频率变化,一旦超出这个区间,电场强度迅速下降。

(4) 天线的输入阻抗在很大程度上取决于激励区周围泥浆和地层的电参数。在钻探过程中,地层参数随深度变化,会使输入阻抗在很大范围内变化。在某些环境中,天线的输入阻抗可能降至 1Ω 以下。

(5) 在地层和泥浆条件恶劣的情况下,用目前的设计方案实现电磁信号随钻传输是困难的,但如果地层和泥浆条件较好,是有可能以目前方案实现电磁随钻测量的。

参 考 文 献

- [1] K.M.Chen, Interaction of Electromagnetic fields with biological bodies in Research Topics in Electromagnetic Wave Theory, Ed. J.A. Kong, John Wiley & Sons Inc. (1981).
- [2] K.M.Chen, *Proc. IEEE*, 65(1977), 1202.
- [3] 陈志雨,靳小州,电磁随钻测量,中国科学院电子学研究所内部试验报告,1988年.
- [4] 中国科学院电子学研究所随钻测量电磁波论证组,电磁随钻测量现场试验报告,1988年

AN ANALYSIS OF THE ELECTRICAL EXCITATION MODE OF EM-MWD

Wang Weiyan Zhang Shourong

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract A method for analyzing electrical excitation mode of electromagnetic measurement while drilling (EM-MWD) is proposed. By this method, a lot of calculations for EM-MWD has been done, and some very important data have been obtained, in which the electric field intensity distribution patterns on the earth's surface, the dependent relations of electric field intensity upon the frequency and the input impedance of the transmission equipment are included. All of the calculated results agree well with that of the laboratory test and the shallow well test.

Key words Electromagnetic measurement while drilling; Electromagnetic scattering;
Electrical excitation mode