

钻井中等轴状导体的瞬变电磁响应

陈锡杰 任怀宗

井中瞬变电磁法是寻找深部隐伏良导矿体的一种有效方法。本文从理论、模型实验和资料解释 3 个方面对井中等轴状导体的瞬变电磁响应进行了分析研究。

关键词：井中瞬变电磁法；等轴状导体的瞬变电磁响应；模型实验；瞬变电磁法成果解释

井中瞬变电磁法利用不接地回线，向地下发送一次脉冲磁场；并在一次磁场间憩阶段，用小回线沿井轴接收地下感应瞬变磁场。由于所测为纯异常，勘探深度较大，并能压制低阻覆盖层的影响。

本文主要研究井中等轴状导体的瞬变电磁响应的分布特征，并讨论了所测资料的解释方法。

瞬变电磁响应公式

设有半径为 R 、导电率为 σ 、导磁率为 μ_0 的非磁性良导球体位于高阻介质中。发射回线产生的一次磁场 H_0 为矩形波脉冲。假定一次磁场断开后的衰减矢量呈指数形式：

$$\vec{A} = A_0 e^{-\sigma t} \quad (1)$$

二次磁场^[1]为：

$$\left\{ \begin{aligned} H_r &= 6H_0 \frac{R^3}{r^3} \cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\pi)^2} e^{-n^2 \cdot t/\tau} \\ &= \frac{2m \cos\theta}{4\pi r^3} \\ H_\theta &= 3H_0 \frac{R^3}{r^3} \sin\theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\pi)^2} e^{-n^2 \cdot t/\tau} \\ &= \frac{m \sin\theta}{4\pi r^3} \\ H_\varphi &= 0 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

将 (2) 式与磁偶子磁场公式相比较，显然良导球体产生的瞬变磁场相当于一个位于球心、磁偶极矩为 \vec{m} 的磁偶极子所产生的

磁场。

野外观测的是瞬变磁场的感应电动势，因而公式 (2) 可改写成：

$$\left\{ \begin{aligned} E_r &= 6H_0 \frac{R^3}{r^3} L^0(\tau, t) \cos\theta \\ E_\theta &= 3H_0 \frac{R^3}{r^3} L^0(\tau, t) \sin\theta \\ E_\varphi &= 0 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中：

$$L^0(\tau, t) = \frac{1}{\pi^2 \tau} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \cdot t/\tau} \text{ 称为时间响应函数,}$$

$$\tau = \mu_0 \sigma R^2 / \pi^2 \text{ 称为时间常数。}$$

沿井轴各点的感应电动势可表示为：

$$E = 3\mu_0 H_0 R^3 L(\tau, t) G \quad (4)$$

其中：

$$G = \frac{3(h-z \sin\beta)(x-z \cos\beta) \cos\beta}{[(x-z \cos\beta)^2 + (h-z \sin\beta)^2]^{5/2}} + \frac{[2(h-z \sin\beta)^2 - (x-z \cos\beta)^2] \sin\beta}{[(x-z \cos\beta)^2 + (h-z \sin\beta)^2]^{5/2}}$$

G 称为几何因子， β 为钻井的倾角； z 为测点距离。

由 (4) 式可看出，瞬变电磁响应衰减的快慢主要取决于时间响应函数，而响应的形态变化主要取决于几何因子 G 。

瞬变电磁响应分布规律

所用仪器为澳大利亚 SIROTEM-I 型

多道瞬变电磁仪，在室内模拟了空气介质中良导体球体瞬变电磁响应在井中的分布。

模拟实验的线性尺度缩比为 1:1000。模型半径为 9cm，导电率为 $2.5 \times 10^7 \text{ } \Omega^{-1}/\text{m}$ 的铝球。在绘制井中响应曲线时， $|e/I| \leq 1$ 以算术坐标绘制， $e/I > 1$ 和 < -1 以对数坐标绘制。

1. 钻井中良导体球体的瞬变电磁响应分布特征 直立钻井中，球体的瞬变电磁响应呈对称“两肩”型分布，即曲线中间有负的极大值、上下有正的次极大值。负极大值位置并不完全对应球心位置，而是略有上移（图1a）。

倾斜钻井中，球体的瞬变电磁响应呈不

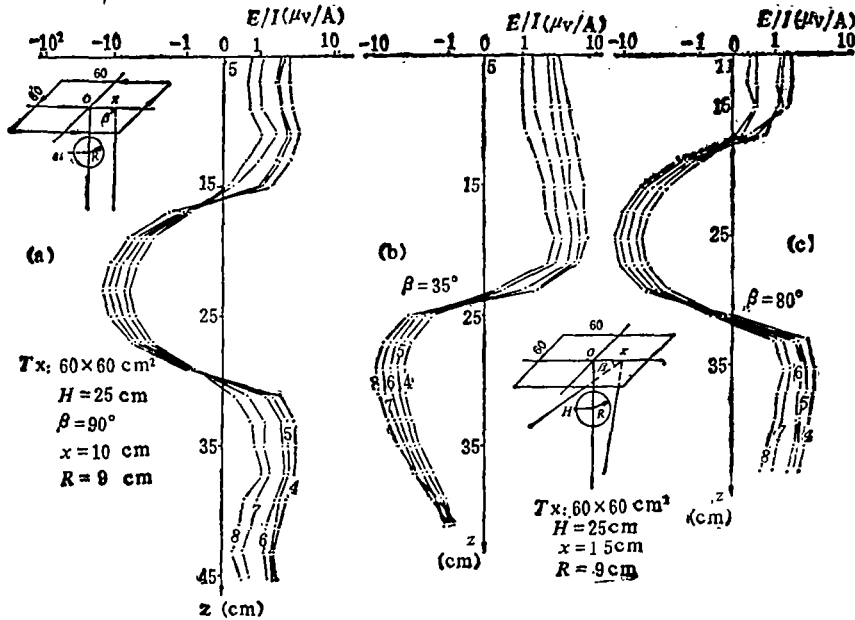


图 1

对称分布。钻井从球体上方倾斜穿过时，瞬变电磁响应呈反“S”型分布。随钻井距球体之间水平距离的增大，响应幅值则迅速减小，响应过零点位置时，发生位移（图1b）。

钻井从球体下方倾斜穿过时，瞬变电磁响应呈不对称的“两肩”型分布。钻井向球体方向延伸所观测到的正瞬变响应值比反方向观测的值要大（图1c）。

2. 模拟实验结果与理论计算结果的比较 首先将模拟实验结果换算成理论计算值，单位为 nV/A 。图 2 反映了钻井倾角为 35° 和 90° 的结果。从图 2 可见，除直立钻井中模拟实验结果与理论计算结果有相对位移外，倾斜钻井中瞬变电磁响应分布吻合得比较好。若将直立钻井中的模拟实验结果相

应地上移 20m，则理论计算结果与模拟实验结果在形态和幅值方面完全吻合。

对于直立钻井中两种结果的明显不吻合，作者认为是一次磁场的均匀不均匀所引起；这反映球体内部晚期等效涡流不是在球半径平面内流动，而是在球心上部某一平面内流动。

井中瞬变电磁法的资料解释方法

1. 用磁偶极子磁场的分布定性描述钻井中瞬变电磁响应的分布特征 从 (2) 式的推导可见，位于大发射回线下方的良导体球体，对外产生的瞬变磁场可以用一个磁偶极

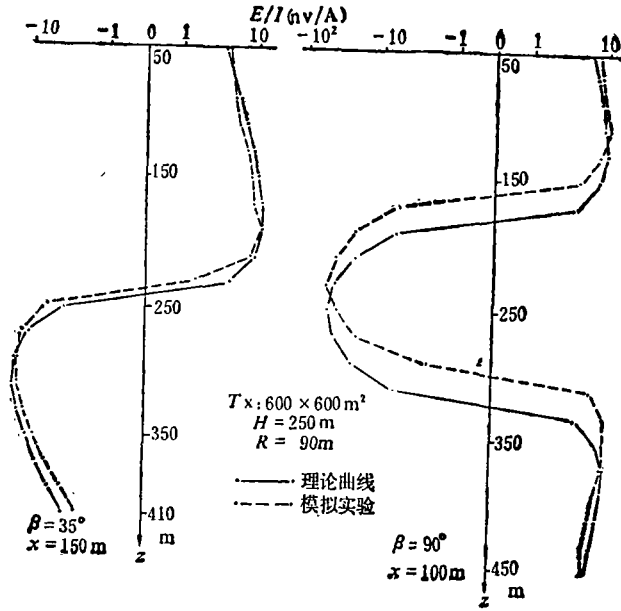


图 2

子的磁场表示。在高阻介质中，由于瞬变磁场只决定于磁偶极子本身，因而可根据磁偶极子磁场的分布特征，沿井轴逐点分析各测点的瞬变磁场变化。

2. 半定量解释方法 本文根据前面导出的理论公式，提出 3 种半定量解释方法：

(1) 用瞬变电磁响应负极大值点确定球体中心埋深 由 (4) 式可知，在直立钻井中，瞬变电磁响应负极大值位置恰好对应球心位置。因而，可由实测曲线负极大值的位置大致确定球形矿体的中心埋深。应注意的是，由于一次磁场的均匀，所求出的中心埋深可能要比实际埋深略浅。

(2) 用响应过零点确定矿体中心在地表的投影位置 令 (4) 式等于零，则可解出

$$x = \left[\frac{3\cos\beta \pm (9\cos^2\beta + 8\sin^2\beta)^{1/2}}{2\sin\beta} \times (h - z_0 \sin\beta) \right] + z_0 \cos\beta \quad (5)$$

当钻井倾角为 90° 时，则有

$$z_0 = h \pm (\sqrt{3}/2)x \quad (6)$$

若两次过零点之间距离用 d 表示，则球

形矿体中心在地表的投影位置可表示为

$$x = d/\sqrt{2} = 0.7d \quad (7)$$

(3) 衰减曲线法 利用电磁响应函数的衰减特性来反求矿体的导电率。

在单对数坐标纸上，绘出实测曲线负极大值点位置的瞬变电磁衰减曲线。将此曲线和理论衰减曲线比较，确定出 τ 值的变化范围。

若已知球体半径，由 $\sigma = \tau\pi^2/\mu_0 R^2$ 可确定矿体的导电率变化范围，其中 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ (亨/米)。

3. 计算机自动反演解释方法 设等效电流环的半径为 R ，埋深为 h ，环中心距井轴之间的水平距离为 D ，则等效电流环对外产生的瞬变磁场可表示为^[2]：

$$\frac{B_z}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{[(R+D)^2 + (z-h)^2]^{1/2}} \times \left[K + \frac{R^2 - (z-h)^2 - D^2}{(R-D)^2 + (z-h)^2} E \right] \quad (8)$$

式中， K 、 E 分别为第一、第二类完全椭圆积分， z 为测点距离。

以此为数学模型，作者还编制了井中球

体瞬变电磁响应资料的计算机自动反演解释程序。

实 例

根据前述结论，首先在物理模拟结果上进行了应用。

1. 直立钻井情况 直立钻井中观测到的瞬变电磁响应曲线如图 1 所示。

(1) 半定量解释结果 从响应曲线负极大值对应的位置，确定出球体的中心埋深为 230m。响应曲线上部零值点位置为 160m，下部为 300m。由 (7) 式得到球心距井轴之间的距离为 99m。

(2) 计算机反演解释结果 按计算要求，首先将物理模拟结果换算成野外观测结果，选取第六道 ($t = 2.5\text{ms}$) 瞬变电磁响

表 1

	球体中心埋深 (m)	球体半径 (m)	x (m)
模型结果	250	90	100
计算初值	230	80	99
反演结果	229	95	131
相对误差, %	0.4	5.4	26.8

应曲线进行迭代拟合。初值由半定量解释结果给出。表 1 给出了计算结果及误差，图 3

反映了迭代结果。

(3) 确定球体的导电率 图 4 中的曲线 a 是电磁响应在负极大值位置的瞬变电磁响应衰减曲线。将此曲线和理论曲线比较，得到 τ 值在 0.015~0.03 范围内变化。由计算机解释结果 $R = 80\text{m}$ 计算求得导电率的变化范围是 14~26 S/m 。这与球体的真实导电率 25 S/m 相差不大。

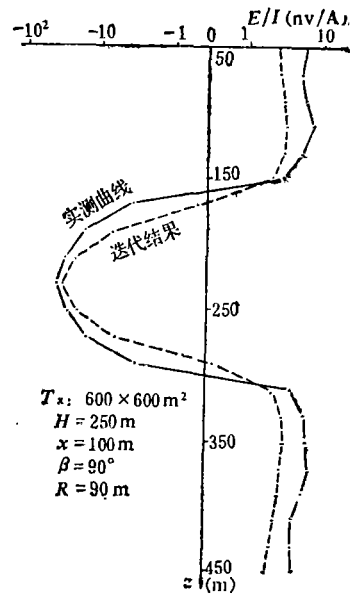


图 3

E/I ($\mu\text{V}/\text{A}$)

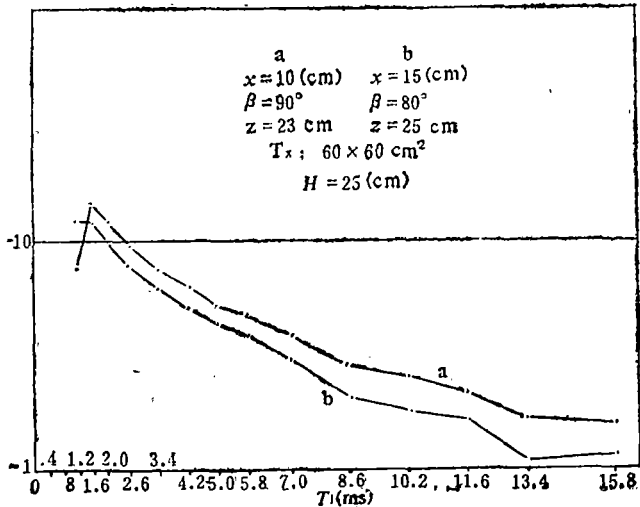


图 4 井中实测瞬变电磁响应衰减曲线

表 2

	球体中心埋深 (m)	球体半径 (m)	x (m)
模型结果	250	90	150
计算初值	250	100	144
反演结果	236	94	124
相对误差, %	5.7	4.3	19

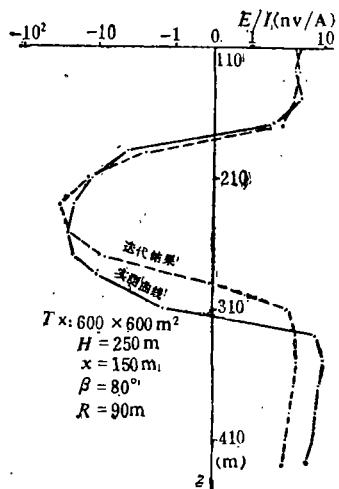


图 5

2. 近似直立钻井情况 图1b是在近似直立钻井中观测到的瞬变电磁响应曲线。与

例 1 的解释方法相同, 表 2 给出了计算结果及误差, 图 5 反映了迭代结果。

图 4 中的曲线 b 是电磁响应在负极大值位置处的瞬变衰减曲线。与理论曲线比较求得导电率变化范围为 11~36 S/m。

结 论

本文用磁偶极子磁场理论来定性研究高阻介质中等轴体的井中瞬变电磁响应的分布, 确定异常体的中心埋深、异常体距钻井之间的水平距离以及异常体的导电率, 对井中瞬变电磁响应法测得的资料提出了简单、快速、有效的推断解释方法。利用等效电流环原理编制的井中瞬变电磁响应反演解释程序, 迭代次数少, 快速、准确, 是一种较好的自动解释方法。

参 考 文 献

- [1] 傅良魁: 《电法勘探教程》, 北京, 地质出版社, 1983.
- [2] 曾昌祺: 《电动力学》, 北京, 人民教育出版社, 1978.
- [3] Dyck, A. V. et. al.: Geophysics, 1964, v. 49, p. 975~980.

Responses of a Buried Equiaxial Conductive Body in Drill Hole Transient Electromagnetic Measurements

Chen Xijie Ren Huaizong

Drill-hole transient electromagnetic measurement is an important prospecting geophysical prospecting method for detecting deep-seated conductive ore body. In this paper responses of an equiaxial conductive body obtained from model experiments and field measurements by the drill-hole transient electromagnetic method, are analysed and an anomaly interpretation method is also proposed.