

文章编号: 1001-1986(2002)06-0058-03

中心回线瞬变电磁测深法快速电阻率成像方法及应用

严良俊¹, 徐世浙¹, 胡文宝², 陈清礼², 胡家华²

(1. 浙江大学地球科学系, 浙江 杭州 310027; 2. 江汉石油学院, 湖北 荆州 434102)

摘要: 利用导电全空间与均匀半空间中心回线源和磁偶极子在阶跃电流激发下磁场公式和扩散速度的定义, 导出了不同条件下瞬变场的扩散速度公式。在此基础之上, 引入瞬变电磁测深全区视电阻率定义数值计算方法, 给出了电阻率成像的一阶与二阶近似公式, 从而建立了一套中心回线瞬变电磁测深快速电阻率成像方法。模型检验结果、实测剖面电阻率成像以及对大地电磁测深视电阻率曲线进行静偏移校正效果均良好, 说明该方法是可行的、有效的。

关键词: 瞬变电磁测深; 扩散速度; 全区视电阻率; 大地电磁测深

中图分类号: P631.3⁺25 **文献标识码:** A

1 引言

中心回线瞬变电磁测深法(TEM)以其装置轻便和受旁侧影响小等特点, 已被广泛应用于油气勘探、工程物探、电法找水和地热勘探领域。另外, 由于中心回线瞬变电磁测深的视电阻率无静态偏移, 故常被用于大地电磁测深(MT)曲线的静校正, 从而使在恶劣地形和复杂地表地质条件下, MT勘探的资料品质大大提高。通常, 中心回线瞬变电磁测深法的视电阻率曲线由于采用早、晚期近似而在过渡区发生畸变。因此, 求解全区视电阻率是准确进行快速电阻率成像的关键。

2 方法原理

主要研究回线框或磁偶极子在阶跃电流激发下的瞬变电磁测深的成像方法。

2.1 导电全空间中的瞬变电磁场

当导电全空间中有一导电回线, 回线中供以阶跃电流时, 其电流的数学描述为:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ I_0 & t \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

此时电场仅有切向分量, 当在 z 轴上观测时, 磁场仅有垂直分量, 测量时往往是测其对时间的变化率(与感应电动势相对应)。其时域表达式为:

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = \frac{I_0 a^2 \sin \theta}{\sqrt{2\pi} R^4 \mu_0} u^5 \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (2)$$

其中 I_0 ——供电电流;

a ——线框的半径;

R ——观测点到线框的距离;

θ —— R 与 z 轴的夹角;

ρ ——导电介质的电阻率;

μ_0 ——自由空间的磁导率;

$$u = \sqrt{\frac{\mu_0}{2\rho t}} R.$$

2.2 均匀半空间中的瞬变电磁场

由文献[1]可知, 当线框置于地表且供以阶跃电流时, 地下任意一点处磁场随时间的变化率为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{I_0 \rho}{\mu_0 a^3} \int_0^\infty L^{-1} \left\{ \frac{e^{-\alpha Z}}{1 + (1+q)^{1/2}} \right\} J_1(\lambda) J_0(K\lambda) \lambda^3 d\lambda, \quad (3)$$

其中 $K = r/a$;

r ——观测点到线框中心的水平距离;

L^{-1} ——相对于 q 的逆拉氏算子;

J_0, J_1 ——0阶和1阶贝塞尔函数;

$Z = z/a$;

$\alpha = \lambda(1+q)^{1/2}$ 。

2.3 瞬变电磁场扩散速度

我们知道, 瞬变场在有耗介质中的传播为扩散方式。根据阶跃电流触发的瞬变电磁场传播特性, 通常将瞬变场的扩散速度定义为 $\partial B / \partial t$ 的极大值向前推移的速度, 则在接收点 P 处的扩散速度定义为:

$$V_T = \frac{\partial R}{\partial t}. \quad (4)$$

由(2)式和瞬变场扩散速度定义可得导电全空间中瞬变场的扩散速度:

收稿日期: 2001-11-19

基金项目: 中国石油天然气集团公司“地球物理勘探应用基础研究”资助(编号: 2000/1—04)

作者简介: 严良俊(1964—), 男, 湖北荆州人, 江汉石油学院地球物理系副教授, 浙江大学地球科学系在读博士生, 从事电磁勘探方法研究与教学工作。

$$V_{T1}=1.58\sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 t}} \tag{5}$$

从上式可以看出, 此时的扩散速度与线框的尺寸无关, 而仅与介质的电导率和传播时间有关。可以证明, 此扩散速度与磁偶极子瞬变场的扩散速度相等。

当介质为均匀半空间时, 由(3)式及文献[11]有

$$V_{T2}=\frac{\rho\sqrt{\gamma}}{a^2\mu_0}[C_1+(C_0^2+2)^{1/2}+(1+\frac{C_1}{(C_1^2+2)^{1/2}})\gamma C_2], \tag{6}$$

其中 $C_1(\gamma)=e^{\gamma}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\Gamma(k+5/2)}{k!(k+1)!}(-\gamma)^k,$

$$C_2(\gamma)=\frac{3\sqrt{\pi}}{4}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(2k-1)!!}{k!(k+2)!}(\frac{\gamma}{2})^k,$$

$$\gamma=\frac{\mu_0 a^2}{4\sigma t}.$$

显然, 此时的传播速度与线框的尺寸有关, 当发射源为磁偶极子时, 则有:

$$V=\lim_{a\rightarrow 0}V_{T2}=1.635\sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 t}} \tag{7}$$

从(5)式和(7)式可以给出磁偶源或回线源激发的瞬变场的传播速度一般公式为:

$$V_T=K\sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 t}}, \tag{8}$$

其中 K 为与场源尺寸有关的系数, 一般在 1.5~2.0 之间。

2.4 全区视电阻率定义与电阻率成像公式

当介质为均匀半空间时, 置于地表的回线中心垂直磁场分量表示为

$$h_z(\rho, t)=\frac{I}{2r}[\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{2}{u}\exp(-\frac{u^2}{2})-(1-\frac{3}{u^2}\Phi(u))], \tag{9}$$

其中 $\Phi(u)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_0^u e^{-\frac{x^2}{2}}dx.$

数值计算研究表明, 上式中的 $h_z(\rho, t)$ 是电阻率的单值函数, 这使以数值方式定义中心回线装置的全区视电阻率成为可能。由上式得全区视电阻率为^[3]:

$$\rho_a=h_z^{-1}(\rho, t), \tag{10}$$

上式可用对分法求解, 该方法稳定可靠。

在全区视电阻率定义完成之后, 利用前述的扩散速度公式可以方便地进行时深转换和电阻率成像。由(8)式可得有效穿透深度

$$D_T=K\sqrt{\frac{\rho_a t}{\mu_0}}, \tag{11}$$

电阻率的一阶近似公式可表示为:

$$\rho=\rho_a(1+\frac{d\log\rho_a}{d\log D_T}), \tag{12}$$

电阻率的二阶近似公式可表示为^[7]:

表 1 地电模型参数

模型	电阻率 $\Omega\cdot m$			厚度 h_m	
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2
K 型	10	100	10	200	200
H 型	1 000	10	100	100	100

$$\rho=\frac{1}{\mu_0}\frac{d^2t}{dD_T^2}. \tag{13}$$

至此, (11) 式与 (12) 式构成了电阻率成像的一阶近似公式; (11) 式与 (13) 式为电阻率成像的二阶近似公式。值得注意的是, 在进行成像时, 应先进行模型与装置的尺寸正演模拟试验, 以确定最佳参数 K , 保证深度参数有较高的精度。

3 模型试算

选用两个典型的 3 层地电模型, 分别为 K 型和 H 型, 其模型参数如表 1 所示。利用(11)式、(12)式与(13)式对两个地电模型正演的磁场数据进行了电阻率成像, 结果如图 1 和图 2 所示。从图中看出, 成像方法对低阻薄层的效果远好于对高阻薄层; 同时也可看出, 一阶近似成像无论是在电阻率方面还是在埋深方面, 其精度远不如二阶近似公式。

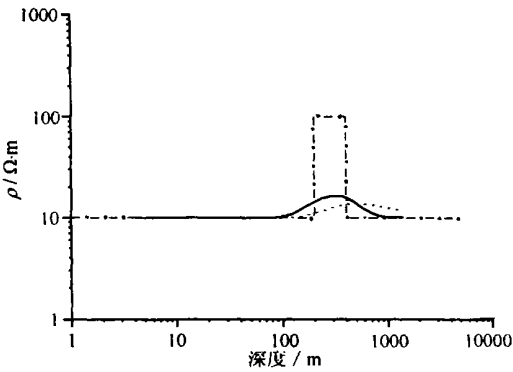


图 1 K 型地电模型成像结果
点画线——模型 虚线——一阶近似成像; 实践——二阶近似成像

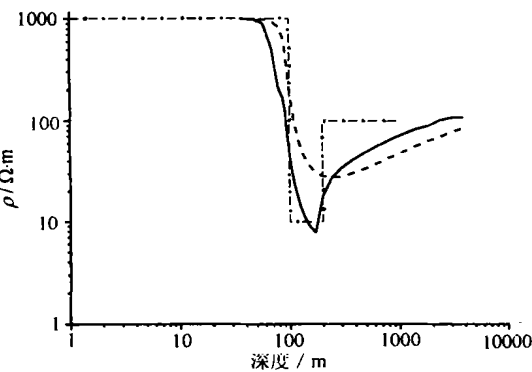


图 2 H 型地电模型成像结果
点画线——模型 虚线——一阶近似成像; 实践——二阶近似成像

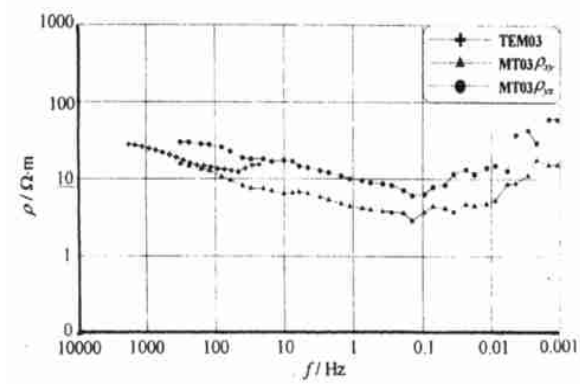


图 3 3 号测点 TEM 与 MT 观测的视电阻率曲线

4 实际应用

我们应用引进的加拿大凤凰地球物理公司 (Phoenix Geophysics Limited) MuITEM 系统 V2000 大地电磁测深系统, 在湖北江陵凹陷北缘进行了中心回线 TEM 与 MT 联合观测试验。MuITEM 系统由 T4 便携式发射机和 V5 接收机组成。电流波形为双极性矩形脉冲, 脉冲宽度为 10 ms, 最大工作电流一般保持在 20 A 左右; 接收机采样率为 2.97 μs, 计算时窗从 0.1 ms 到 8 ms。

工区地势平坦, 易于施工, 但电干扰较为强烈。所有测点 300 m 外均有农用高压电线, 对资料采集有较大影响, 特别是对 MT 采集影响尤为突出。在 1 平方公里范围内布置了两条十字交叉线, 方向分别为南北向和东西向, 测线编号为 CBH-NS 和 CBH-EW。因 CBH-NS 线测点较多, 这里仅介绍 CBH-NS 测线的处理结果。

该测线上 6、3、12 号测点都进行了 TEM 与 MT 两种方法观测, 以检测两种方法的一致性, 同时探讨用 TEM 对 MT 进行静校正的有效性。图 3 是 3 号测点上进行中心回线 TEM 与 MT 观测的视电阻率曲线 (注: TEM 视电阻率曲线进行了时-频转换, 以便与 MT 曲线对比)。从图中看出, MT 的两支视电阻率曲线的首支与中频段有明显地上下平移分离现象, 说明存在严重的静态偏移; 而 TEM 视电阻率曲线与 ρ_{xy} 的首支重合, 显然, 发生静态偏移的是 ρ_{yx},

校正方法是将 ρ_{yx} 曲线向下平移至与 TEM 曲线重合为止。总之, 运用 TEM 曲线校正 MT 曲线, TEM 曲线是标准, MT 的两种极化的视电阻率曲线均应向 TEM 曲线看齐。

应用前述的成像公式对 CBH-NS 测线进行了电阻率成像, 图 4 是成像剖面图。从图看出, 中心回线 TEM 法能对埋深 400 m 以上的地电构造有良好的显示。200 m 以上, 地层平滑, 分层清晰; 200 m 以下, 电性横向变化较大, 在 7 号点与 8 号点之间、9 号点与 10 号点之间, 出现明显的断层显示。剖面结果说明快速电阻率成像方法具有较高的纵横向分辨率, 应用效果良好。

5 结论

中心回线 TEM 电阻率成像方法具有速度快、成像精度较高和易于现场操作等特点。这对现场人员及时掌握 TEM 采集情况、有效地对 MT 曲线进行静态校正和布署下一步工作方案是非常有宜的。成像结果为高质量地质解释提供了有力保证。值得注意的是, 该方法在对高阻层进行成像时效果较差。

感谢煤碳科学研究院西安分院物探研究所所在 TEM 资料采集中的大力支持。

参考文献

- [1] 朴华荣编著. 电磁测深法原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [2] 严良俊, 胡文宝等. 长偏移距瞬变电磁测深的全区视电阻率求取及快速反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5).
- [3] Spies B R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods [J]. Geophysics, 1989, 54(7): 872—888.
- [4] Das U C. Multi-separation multi-system electromagnetic depth sounding——An extension for unification[J]. Geophysics, 1987, 62: 56—62.
- [5] Eaton P A, Hohmann G W. A rapid inversion technique for transient electromagnetic soundings[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1989, 53: 384—404.
- [6] Kaufman A A. Harmonic and transient fields on the surface of a two-layer medium[J]. Geophysics, 1979, 44: 1208—1217.
- [7] Macnae J. Imaging quasi-layered conductive structures by simple processing of transient electromagnetic data[J]. Geophysics, 1987, 52(4): 545—554.

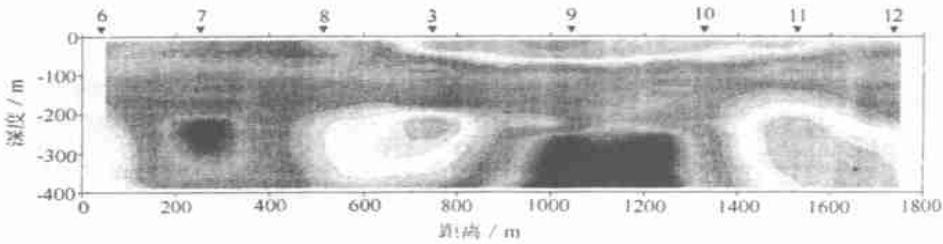


图 4 CBH-NS 测线中心回线 TEM 试验电阻率成像剖面图

·探矿工程·

文章编号: 1001-1986(2002) 06-0061-02

金刚石—硬质合金超硬复合柱齿优化设计探讨

史晓亮, 段隆臣, 刘晓阳, 汤凤林, 陈小松

(中国地质大学勘察与基础工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过研究常规超硬复合柱齿碎岩机理, 提出了超硬球齿部分外形的优化设计, 分析了其碎岩机理, 推导出合理的双唇面超硬球齿半径之间的关系式, 这为冲击回转钻进提供了依据。

关键词: 双唇面; 超硬球齿; 优化设计

中图分类号: P634.4⁺1 文献标识码: A

1 概述

金刚石(cBN)—硬质合金复合柱齿作为一种制作金刚石钻头的新型超硬材料产品, 正在被开发应用于石油、地质、煤田钻探领域, 取得了良好的经济效益和社会效益。为了进一步提高超硬复合柱齿的耐磨性和抗冲击性能, 国内学者展开了大量的研究工作。这些研究大多集中于优化设计复合柱齿的结构、配方和制造工艺流程, 其中包括: 合理设计超硬复合柱齿的结构和性能及选择合适的烧结设备和制造工艺流程; 通过改变对多种不同配方和烧结工艺, 以及测试试样的性能, 总结粘结金属的种类及含量, 探讨烧结工艺对超硬复合柱齿性能的影响规律, 从而优选超硬复合柱齿的配方和烧结工艺参数。但是, 对超硬复合柱齿外形的优化研究却很少进行。实际上, 超硬球齿外形结构的合理性直接影响复合柱齿的破岩效果、钻头钻进效率, 同时优化的外形可增强复合柱齿适应坚硬岩层的能力, 降低复合柱齿的损耗, 从而能降低施工成本。

2 常规复合柱齿形状及碎岩机理

2.1 常规复合柱齿的外形

常规复合柱齿外形如图 1a 所示。

2.2 常规复合柱齿碎岩机理

球状切削具压入岩石时, 可以分为两种破坏形式。第一种形式是形成相交的裂隙系, 第二种是剪

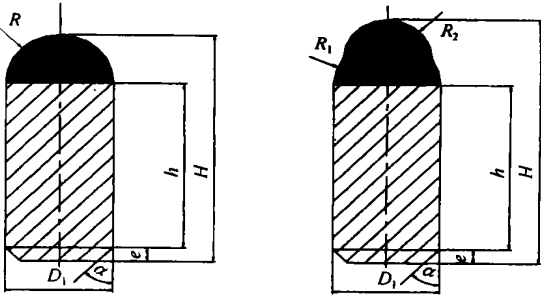


图 1 复合柱齿形状示意图

R——超硬球齿半径 H——复合柱齿总高度; h——基体部分高度;
e——倒角部分高度; D₁——基体部分圆柱直径; α——倒角角度;
R₁——二级超硬球齿半径; R₂——前级超硬球齿半径

收稿日期: 2001-11-27

作者简介: 史晓亮(1974—), 男, 黑龙江人, 中国地质大学博士生, 从事基础工程施工、非开挖管线施工和超硬材料的研究工作。

[8] Nekt A G. Direct inversion of time-domain electromagnetic data[J]. Geophysics, 1987, 52(10): 1431—1435.
[9] Nabighian M N. Quasi-static transient response of a conducting half-space—An approximate representation[J]. Geophysics, 1979, 44: 1700—1705.

[10] Peny A E, Hohmann G W. A rapid inversion technique for transient electromagnetic soundings[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1989, 53: 384—404.
[11] Raiche A P, Gallagher R G. Apparent resistivity and diffusion velocity[J]. Geophysics, 1985, 50: 1628—1633.

A rapid resistivity imaging method for central loop transient electromagnetic sounding and its application

YAN Liang-jun¹, XU Shi-zhe¹, HU Wen-bao², CHENG Qing-li², HU Jia-hua²

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Jiangnan Petroleum University, Jinzhou 434102, China)

Abstract: We developed a fast resistivity imaging method for central loop transient electromagnetic sounding (TEM). Firstly, diffusion velocities were derived on the basis of propagation features of transient electromagnetic filed in full conductive space and half conductive space. Secondly, the all time apparent resistivity curve was calculated with numerical method after studying the half space function of vertical component of magnetic field. And finally, imaging formulas were given with diffusion velocity and all time apparent resistivity. The model tests and field example testified the validity of imaging for geo-electrical structure and electromagnetic sounding (MT) correction.

Key words: TEM; diffusion velocity; all time apparent resistivity; MT