doi:10.11720/wtyht.2014.4.40

杨毅,邓晓红,张杰,等.一种井中瞬变电磁异常反演方法[J].物探与化探,2014,38(4):855-859,864.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.4.40 Yang Y, Deng X H, Zhang J, et al. A borehole TEM anomaly inversion method[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2014,38(4):855-859,864. http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.4.40

# 一种井中瞬变电磁异常反演方法

# 杨毅,邓晓红,张杰,武军杰,王兴春

(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000)

摘要:井中瞬变电磁法在深部找矿中得到广泛应用并取得丰硕成果,然而解释技术目前仍以定性和半定量为主, 这在很大程度上制约了该方法的运用和推广。鉴于此,笔者采用遗传算法开展了基于等效涡流的井中瞬变电磁纯 异常反演研究,反演以导体内感应电流环为对象,能够准确地确定井中或井旁异常体的尺度、倾角、中心坐标等参 数。对 Maxwell 软件薄板模型的正演数据和实测数据的反演结果进一步验证了算法的正确性和适用性。 关键词:井中瞬变电磁;等效涡流;遗传算法;定量反演

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2014)04-0855-05

井中瞬变电磁法是将发射回线布置在井孔上方或 其附近地面上,用井下探头在钻孔中逐点测量,又称为 地—井 TEM 法。由于探头位置接近导电矿体, 目探头在 井中受导电覆盖层和外部电磁干扰小,因此能获得比地 面方法更强的异常响应信号。为此,地—井 TEM 法在深 部找矿中利用可用之钻孔,以寻找井旁、井底盲矿,具有 独特的、不可替代的优势[1-3],取得了很多非常成功的深 部找矿成果[4-13]。但是,由于瞬变电磁的复杂性,地—井 TEM 法的解释技术却相对落后,多年来主要以定 性[14-16]、半定量[17] 解释为主,解释技术成为影响运用 地—井TEM 法的"瓶颈"。国外 Barnett C T<sup>[18]</sup>、Fullagar<sup>[19]</sup>提出了一种采用等效电流回路代替简单形体模型 的井中 TEM 响应的反演方法,能够近似地对地—井 TEM 进行快速反演,达到定量解释的目的。这种定量反 演技术,以解决异常地质体的边界、产状等空间参数问 题.无疑将更为有效且实用。



图1 导电薄板涡旋电流分布示意

# 1 等效涡流原理

自由空间中局部导体的响应特点是建立在感应涡 流的特征上,以简单和实用的导电薄板为例。设导电薄 板位于均匀一次场中,当发射回线中的电流突然关断,一 次场瞬间消失,根据法拉第定律,为了维持导体内原来的 均匀磁场,板体内立即感应出涡流,导电薄板上感应涡流 的磁矩要垂直于板面。感应涡流在板内将形成与导电板 体形状相似的电流环分布,早期是集中在板的边缘,然后 向导体中心扩散。短时间间隔后,这一电流分布达到了 一种准平衡状态,然后作简单地振幅衰减。由理论和数 字模拟可以证明,不仅在晚期,即便在较早期,这一电流 分布也可以用一个等效电流环表示<sup>[20-22]</sup>,如图1所示。 基于等效涡流原理,笔者采用圆形载流环来对感应涡流 进行等效,其在自由空间中任意点 P 的磁场响应如图 2 所示。



图 2 圆形载流环在空间任意点 P 产生的磁场

#### 收稿日期:2014-05-15

基金项目:中国地质调查局老矿山深部和外围找矿项目(12120113085800)和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所基本科研业 务费专项(AS2012J09) 等效涡流的数学表达式为

$$B_x = \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \cos \phi}{r^3} \mathrm{d}\phi \quad , \tag{1}$$

$$B_{y} = \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \sin \phi}{r^3} \mathrm{d}\phi \quad , \tag{2}$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(R - y \sin\phi - x \cos\phi)}{r^3} d\phi \quad (3)$$

式中: $B_x \ A_y \ B_z \ D$ 别为电流强度为I,半径为R的圆 形电流环在自由空间中点P产生的 $x \ y \ z$ 方向上的 磁场响应; $\mu_0$ 为自由空间磁导率;r为圆形载流环边 上某点至计算点P的距离; $\phi$ 为圆形载流环边上某 点至载流环中心的连线与x轴夹角。

### 2 反演的实现与验证

依据上节推导的自由空间中圆形电流环产生的 磁场公式,结合遗传算法,编制了基于等效涡流的 地一井 TEM 纯异常反演程序。由于笔者基于等效 涡流的假设为简化的电流环模型,因此在评估反演 结果时采用相关系数和拟合度

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{N} O_i T_i}{\left(\sum_{i=1}^{N} O_i^2 \sum_{i=1}^{N} T_i^2\right)^{1/2}}, P = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (O_i - T_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^{N} O_i^2\right)^{1/2}}\right]$$

来表征拟合程度。式中:*C*表示相关系数;*P*表示拟 合度;*O<sub>i</sub>(i=1,…,N)*为第*i*个观测值;*T<sub>i</sub>(i=1,…,N*))为第*i*个计算值。反演程序流程图如图 3 所示。



# 图 3 基于遗传算法的地—井 TEM 纯异常反演流程

为了对程序的正确性进行验证,首先使用商用 瞬变电磁软件 Maxwell 建模,计算自由空间中薄板 的磁场响应,获得响应数据和特征曲线,然后再用笔 者编写的反演程序对这组正演模型数据进行反演。 正演理论模型参数如下:发射框大小 200 m×200 m, 中心坐标(0,100,0),采样延时为 Crone 50 ms,采样 道数为36道,发射电流1A,响应单位pT,异常体尺度150m×150m,异常中心(0,100,-300),异常体纵向电导为100S,薄板倾角为80°,钻孔垂直于x轴,薄板井孔位置关系如图4所示。



图 4 薄板井孔位置关系

正演结果见图 5,图中仅列出早、中、晚三个时 段中 6 个延时(0.14、0.641、2、5.15、16、34.08 ms)的 响应结果。由于钻孔垂直于 x 轴,因此 x 分量磁场 响应为零。从图中可以看出,Maxwell 计算的 z 分量 响应呈正"S"型,零值点近似在 300 m,y 分量响应 曲 线 呈 近 似 对 称 负 异 常,异 常 最 强值也近似在300m,据此给定z坐标中心范围 -300~-295;考虑到薄板倾斜对两个分量形态的影 响,给定倾角变化范围 0~90°;依据井孔与异常的位 置关系可以确定,异常中心位于正半轴,给定异常中 心的 y 坐标一个较宽泛的初始范围 50~500;电流环 半径初始范围与 y 坐标大概一致,给定 50~500;根 据经验试算给定电流强度在 0.001~1。据此获得电 流环初始模型参数,如表1所示。种群规模设为 1 000,种群个数设为 6。

表1 电流环初始模型参数

参数	下限	上限
电流/A	0.001	1
电流环半径/m	50	500
倾角/°	0	90
电流环中心 x 坐标/m	0	0
电流环中心 y 坐标/m	500	50
电流环中心 z 坐标/m	-295	-305

反演拟合曲线如图 5 所示,从图 5 可以看出,基 于电流环的反演结果与早中晚三期各道响应结果拟 合良好。

反演得到的电流环与理论薄板的空间相对位置 如图 6 所示,图中,蓝色线框为发射框,绿色方框为 真实模型薄板体,红色方框为不同道反演所得薄板 模型。从图 6 中可以看出,各道反演所得圆形电流



图 5 不同延时反演拟合曲线

环与真值薄板在空间形态上对应良好,即倾角和中 心坐标反演较好,尺度则是以薄板同心圆为半径轻 微变动(数据如表2所示),基本能反映薄板规模即 空间展布。综上所述,笔者编写程序的正确定性得 到了验证。

下面将通过对实测地—井 TEM 三分量响应数 据的反演来验证程序的适用性。ZK1108 的地—井 TEM 测量是非常成功的典型实例,发现并验证了井 旁盲矿异常。以 ZK1108 的实测数据及已知的验证 结果对基于等效涡流的地—井 TEM 纯异常反演程 序进行进一步验证。井孔测量结果对应的装置参数 为:发射回线边长 100 m×100 m;钻孔位于回线中 心;发射电流 10 A;下降沿 0.5 ms;采样延迟时间 Crone 50 ms,采集道数 36 道。



图 6 薄板体与各道反演所得电流环在空间上的关系

表 2 反演获得的电流环参数列表

延时/ms	电流/A	半径/m	倾角/°	<i>x</i> 坐标/m	y 坐标/m	z 坐标/m	拟合度/%	相关系数
0.14	0.0123	62.2681	79.9118	0	108.4610	-298.5092	99.9180	0.9999
0.641	0.0120	61.7802	79.9927	0	108.8220	-298.4841	99.9219	0.9999
2	0.0083	67.6544	80.4646	0	101.7042	-299.7683	99.9268	0.9999
5.15	0.0087	61.6901	79.8971	0	108.6816	-298.5588	99.9262	0.9999
16	0.0037	63.6873	80.5353	0	106.4919	-298.9418	99.9341	0.9999
34.08	0.0011	61.9223	79.994	0	108.6845	-298.4318	99.9206	0.9999
理论薄板	-	75	80	0	100	-300	-	-
平均绝对误差	-	±11.8329	±0.1326	-	±7.1409	±1.2177	-	-

对实测三分量剖面响应数据进行异常场提取并 积分后,获得的三分量感应磁场纯异常剖面曲线如 图 7 所示。从图中可以看出,孔深 30~50 m 有明显 的异常显示。

依据钻孔方位与异常方位的关系可知,图 7 所 示 z 分量显示为负异常,判定为井旁异常,x、y 方向 的异常响应均为正"S"型,判定异常位于第一象限, 其响应中心 z 坐标位于区间(-35,-40)。考虑到响 应幅值与规模,设定电流环半径区间为(5,30),电 流环中心 x、y 坐标区间(5,30)。据此获得电流环 初始模型参数,如表 3 所示。种群规模设为 1 000, 种群个数设为 6。







参数	电流/A	电流环半径/m	倾角/(°)	电流环中心 x 坐标/m	电流环中心 y 坐标/m	电流环中心 z 坐标/m
下限	0.001	5	0	5	5	-40
上限	1	30	30	30	30	-35

反演拟合曲线如图 8 所示,不同道反演得到的 电流环和假设薄板的空间位置如图 9 所示。从图 8 中可以看出,对于早期和中期反演曲线拟合情况较 好,而晚期则受限于数据质量和响应强度,拟合结果 不佳。从图 9 中可以看出,不同道反演得到的电流 环倾角和半径不尽相同,分析可知这是由于实际异 常体是三维体所致。因此我们认为,通过对井中瞬 变电磁三分量响应不同道的反演,可以将三维体在 空间上的形态进行大致描述。对相关度和拟合度较 大的前 16 道反演结果进行了统计,结果表明在中心 位置确定上,每个等效电流环的中心位置浮动范围 很小,其中电流环中心到孔的距离为 15.8~18.6 m, 中心埋深为 35.5~39.5 m。ZK1108 对应的矿体开采 后发现呈大漏斗形,矿体距孔约 17 m,中心距地面 约 38 m,矿体最宽处约 18 m,最厚约 15 m,矿体在 主断面及水平面上的投影如图 10 所示。可见,反演 结果与实际开采验证的矿体中心基本一致。



图 8 地—井 TEM 响应各道实测曲线和拟合曲线



图 9 地—井 TEM 响应各道反演所得电流环与薄板空间位置

#### 3 结论

(1)笔者实现了基于等效涡流的地—井 TEM 纯异常反演。通过反演,可以获取异常体的空间尺 度、倾角、中心位置等重要参数,实现真正意义上的 定量反演。

(2)通过对商用瞬变电磁软件 Maxwell 中理论 薄板模型响应数据的反演,电流环参数与理论薄板 模型的参数对应良好,验证了基于等效涡流的地— 井 TEM 纯异常反演程序的正确性。

(3) 对实测地—井 TEM 数据进行了反演,获取 了异常体的倾角和空间尺度参数,在解释技术上较 之以前的定性和半定量方法取得了巨大进步。

笔者所提的等效涡流反演方法是对纯异常开展 的反演方法,在此之前的纯异常提取是个难点。由 于篇幅有限,文中未对纯异常提取进行讨论,但数据 处理中这是一个非常重要的问题,应该予以重视。

#### 参考文献:

- 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[J].北京:地质出版社, 1998.
- [2] 胡平,石中英.地井 TEM 工作方法及解释技术研究成果报告 [R].地质矿产部"八五"科技攻关项目研究成果报告,1995.
- [3] 胡平.地井瞬变电磁法(TEM)方法技术手册[R].地质矿产部 "八五"科技攻关项目研究成果报告,1995.
- [4] Mutton A J.Applications of downhole SIROTEM surveys in the agnew Nickel Belt, WA [ J ]. Exploration Geophysics, 1987, 18 ( 3 ) : 295–303.
- [5] Bishop J R, Lewis R J G, Macnae J C. Down-Hole electromagnetic surveys at Renison Bell, Tasmania [J]. Exploration Geophysics, 1987.
- [6] Irvine R J.Drillhole TEM surveys at Thalanga, Queensland [J].Exploration Geophysics, 1987.



#### 图 10 ZK1108 井旁矿体实际空间位置分布

- [7] Lane R J L. The downhole EM rsponse of an itersected mssive slphide dposit, South Australia [J]. Exploration Geophysics, 1987.
- [8] Eadie T. The downhole EM rsponse of the hellyer ore deposit[J]. Exploration Geophysics, 1987.
- [9] Hughes N A, William R. Ravenhurst, three component DHEM surveying at Balcooma[J]. Exploration Geophysics, 1996.
- [10] Elders J, Wellington A. An application of reverse coupling to increase signal strength beneath conductive sediments-Miitel Mine, Kambalda, W.A.[J].Exploration Geophysics, 1998.
- [11] 崔霖沛,吴其斌,等.寻找以铜为主的隐伏矿床的物探方法 [M].地质矿产信息研究成果:三十,1994.
- [12] 国土资源部信息中心.国外重要成矿区带典型找矿案例和勘查 技术应用[M].1999.
- [13] 施俊法,姚华军,李友枝,等.信息找矿战略与勘查百例[M].地 质出版社,2005.
- [14] Woods D V.A model study of the crone borehole pulse electromagnetic (PEM) system[D].Kingston:Queen's University, 1975.
- [15] Dyck A V, West G F. The role of simple computer models in interpretation of wide-band, drill-hole electromagnetic surveys in mineral exploration [J]. Geophysics, 1984, 49:957-980.
- [16] 吴凤翔.瞬变场法研究[R]."七五"国家重点科技攻关项目第 55 项子专题研究报告,1990
- [17] 张杰,吕国印,赵敬洗,等.地一井 TEM 向量交会技术的实现和 应用效果[J].物探化探技术技术,2007(S1):162-165.
- [18] Barnett C T. Simple inversion of time-domain electromagnetic data [J].Geophysics, 1984, 49:925-933.
- [19] Fullagar P K.Inversion of down-hole TEM data using circular current filaments[J].Exploration Geophysics, 1987, 18:872-888.
- [20] Nabighian M N.Quasi-static transient response of a conducting halfspace-An approxi-mate representation[J].Geophysics, 1979.
- [21] Keating P B, Crossley D J.The inversion of time-domain airborne electromagnetic data using the plate model [J]. Geophysics, 1990, 55:705-711.
- [22] 米萨克纳比吉安.勘查地球物理电磁法:第一卷[M].赵经祥等 译.北京:地质出版社,1992.

#### Seismic prediction of effective reservoir in Eocene bearh-bar sandstone of Dongying depression

YU Jing-Qiang, QU Zhi-Peng, WU Ming-Rong, LUO Ping-Ping

(Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield Branch Co., Ltd., Dongying 257022, China)

**Abstract**: Late Eocene beach bar sandstone constitutes an important reservoir type in Dongying depression. As the beach bar sandstone is thin and interbedded with mudstone, it is difficult to identify it from normal seismic data. Aimed at solving the key issues of the beach bar sandstone existent at the development stage, the authors proposed the employment of a variety of geophysical methods such as frequency division multiple attribute dimension reduction and reflection coefficient inversion to solve the problem of effective reservoir microscopic description. The transformation from qualitative prediction to quantitative prediction is realized in the beach bar sandstone reservoir prediction studies. These methods have certain promoting significance for the description of the same sedimentary type.

Key words: Eocene; beach-bar sandstone; thin interbeds; reservoir prediction; Dongying depression

作者简介:于景强(1981-),男,工程师,主要从事地震资料综合解释工作。

上接 859 页

#### A borehole TEM anomaly inversion method

#### YANG Yi, DENG Xiao-Hong, ZHANG Jie, WU Jun-Jie, WANG Xing-Chun

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: Borehole TEM is widely used in deep prospecting and has achieved fruitful results; nevertheless, qualitative and semi-quantitative interpretation is mainly used in borehole TEM data Interpretation at present, which restrictes the use and popularization of this method to a large extent. In view of this situation, the authors studied pure anomaly inversion of TEM based on current filament by using genetic algorithm. With this method, we can accurately determine the size, dip and center coordinates of the in-hole or off-hole abnormal body. The inversion results of sheet model forwarded by Maxwell software and measured data further prove the correctness and applicability of the algorithm.

Key words: borehole TEM; current filament; genetic algorithm; quantitative inversion

作者简介:杨毅(1985-),男,2010年毕业于吉林大学,获硕士学位,现在主要从事电磁法勘探方法技术研究。