高温超导TEM瞬变磁场拟二维反演及应用效果

张杰[1],吕国印[1],郭布领[2],陈晓东[1],武军杰[1],王兴春[1]
(1. 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; 2. 河北省区域地质矿产调查研究所,河北 廊坊 065000)

摘 要:随着高温超导技术的应用及完善,在TEM测量中直接观测瞬变磁场信号已成为现实,而瞬变磁场数据反演解释方法成为当前急需解决的问题。在借鉴感应电动势资料反演解释方法的基础上,全面阐述了基于瞬变磁场的视电阻率定义,研究了TEM瞬变磁场拟二维反演技术,并从理论模型及实测资料两个方面验证了方法技术的实用性,为促进高温超导TEM的发展提供了方法技术支撑。

关键词:TEM测量;高温超导;瞬变磁场;拟二维反演
中图分类号:P631 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8918(2010)02-0205-04

在瞬变电磁法测量中,直接测量瞬变磁场响应具有很多优势,如信噪比强、勘探深度明显增大、解决解释技术的多解性问题等。但以往由于缺少实用的瞬变磁场数据采集技术,国内外很少有人开展瞬变磁场数据的解释技术研究,更未见相关的报导和文献。地科院地球物理地球化学勘查研究所从20世纪80年代开始,就一直致力于高温超导应用技术的研究,近年来取得了一系列的重大突破。采用高温超导磁强计作传感器,在瞬变电磁测量中已经能够采集到高质量的瞬变磁场信号,并相应开展了基于瞬变磁场数据的解释技术研究,取得了较好的应用效果。

1 TEM瞬变磁场拟二维反演成像方法

感应电动势是瞬变磁场B对时间t的导数dB/dt,两者之间有很大的区别,也有许多相似的特征和规律。利用感应电动势解释技术的研究成果,分析和总结了瞬变磁场响应的规律和特征,研究基于瞬变磁场数据的拟二维反演成像方法。

1.1 视电阻率的定义与计算

设在均匀大地表面上铺设一圆形回线,通以阶跃电流,并在$t=0$时刻断开电源,即$t<0$时,$I(t)=I$;$t\geq 0$时,$I(t)=0$。在圆形回线的中心,以感应线圈观测得到的感应电动势垂直分量响应为[1-3]

$$\varepsilon_z = \frac{\mu_0 A_R I}{4at}\frac{1}{u^2}\left[3\mathrm{erf}(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}}u(3+2u^2)e^{-u^2}\right], \quad (1)$$

用高温超导磁强计作传感器,可以观测到瞬变磁场垂直分量,其响应公式为[3-4]

$$h_z = \frac{I}{a}\frac{1}{u^2}\left[\left(\frac{u^2}{2}-\frac{3}{4}\right)\mathrm{erf}(u) + \frac{3u}{2\sqrt{\pi}}e^{-u^2}\right], \quad (2)$$

式中,A_R为接收线圈的有效面积,I为发射电流强度,a为圆形发射回线的半径,μ_0是自由空间的磁导率,erf为误差函数(图1)。

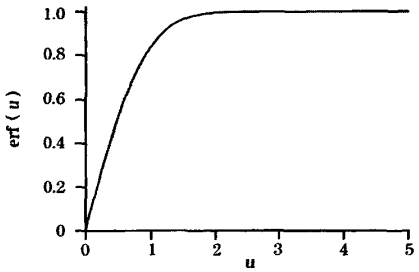

图1 误差函数曲线

1.1.1 早期视电阻率定义[1-3]

当$t\to 0$时,称为早期,由于$u\to\infty$,所以$\mathrm{erf}(u)\approx 1$,且利用罗必塔法则可以证明

$$\lim_{u\to\infty} u^k \exp(-u^2/2) = 0,\ k = 1,3,5,\cdots$$

所以感应电动势和瞬变磁场早期响应的近似公式为

$$\varepsilon_z = 3A_R I\rho/a^3,$$

$$h_z = \frac{I}{2a}\left(1-\frac{6t\rho}{\mu_0 a^2}\right),$$

从而得到感应电动势和瞬变磁场定义的早期视电阻率公式

$$\rho_e^e = a^3\varepsilon_z/(3A_R I),$$

收稿日期:2009-03-19

万方数据

$$\rho_h^e = \frac{\mu_0 a^3}{3It}\left(\frac{I}{2a} - h_z\right) 。$$

1.1.2 晚期视电阻率定义[1-3]

在晚期条件下 $u \to 0$，可将 $\mathrm{erf}(u)$ 和 $\exp(-u^2)$ 用泰勒级数展开，代入式(1)和式(2)，得到晚期的感应电动势和瞬变磁场的表达式

$$\varepsilon_z = (Iu_0^{5/2}A_R a^2)/(20\pi^{1/2}\rho^{3/2}t^{5/2}) ,$$

$$h_z = (Iu_0^{3/2}a^2)/(30\pi^{1/2}\rho^{3/2}t^{3/2}) 。$$

所以，感应电动势和瞬变磁场定义的晚期电阻率公式分别为

$$\rho_\varepsilon^l = (I^{2/3}a^{4/3}A_R^{2/3}\mu_0^{5/3})/(20^{2/3}\pi^{1/3}t^{5/3}\varepsilon_z^{2/3}) ,$$

$$\rho_h^l = (I^{2/3}\mu_0 a^{4/3})/(30^{2/3}\pi^{1/3}h_z^{2/3}t) 。$$

1.1.3 全域视电阻率定义

采用早期或晚期定义的视电阻率公式虽然简便，但用以计算中期的视电阻率则误差很大。而实际工作中早延时段往往处于中期，所以研究全域视电阻率的计算具有实际意义。近年来许多国内外学者相继提出全域视电阻率定义，其基本思想是在进行视电阻率定义时，不对均匀半空间场进行各种近似，而是直接由均匀半空间场的精确表达式求取电阻率，由于电阻率与场之间是复杂的隐函数关系，无法直接求取电阻率对场值的反函数。可以通过数值逼近或反演迭代方法求解[1,4-6]。

对式(1)、式(2)，令

$$f_\varepsilon(u) = \frac{1}{u^2}\left[3\mathrm{erf}(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}}u(3+2u^2)\mathrm{e}^{-u^2}\right] ,$$

$$f_h(u) = \frac{1}{u^2}\left[\left(\frac{u^2}{2} - \frac{3}{4}\right)\mathrm{erf}(u) + \frac{3u}{2\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-u^2}\right] 。$$

$f_\varepsilon(u)$、$f_h(u)$ 称为中心回线方式瞬变电磁测深法的归一化场值，函数曲线见图2。由图可见，感应电动势定义的全域视电阻率是无解或多解的，而由瞬变磁场定义的全域视电阻率是单值的。

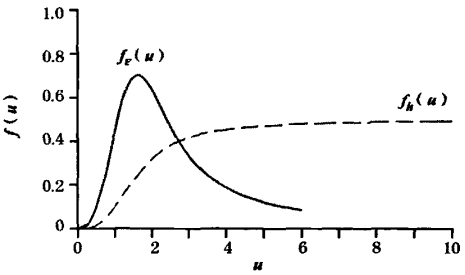

图2 $f_\varepsilon(u)$、$f_h(u)$ 与 u 的关系曲线

以往直接观测的通常是感应电动势，所以计算全域视电阻率时往往先通过数值积分将感应电动势转换为瞬变磁场，再由瞬变磁场计算全域视电阻率。对式(2)，设

$$F(u) = \frac{I}{a}\frac{1}{u^2}\left[\left(\frac{u^2}{2} - \frac{3}{4}\right)\mathrm{erf}(u) + \frac{3u}{2\sqrt{\pi}}\mathrm{e}^{-u^2}\right] - h_z = 0,$$

则 $F(u)$ 有唯一解，通过对分法可求出 $F(u)$ 的高精度近似解 u^*，则由瞬变磁场定义全域视电阻率为

$$\rho = \mu_0 a^2/(4tu^{*2}) 。$$

1.2 “烟圈”效应与勘探深度计算[1]

M. N. Nabighian 认为感应涡流场在地表引起的瞬变电磁响应为地下各个涡流层的总效应，这种效应可近似地用向下传播的电流环来等效。这些电流环好象是发射回线吹出的“烟圈”，其形状与发射回线相同，随着延迟时间增大而向外、向下扩散。计算地表瞬变电磁响应可以用某时刻地下的电流环镜像相等效。

对于中心回线方式，某时刻“烟圈”的穿透深度和运动速度为

$$D = \frac{a}{2\sqrt{v}}\left[C_1(v) + \sqrt{c_1^2(v)+2}\right],$$

$$V = \frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t} = \frac{\sqrt{v}}{\sigma\mu_0 a}\left\{C_1(v) + \sqrt{C_1^2(v)+2} + \left[1 + \frac{C_1(v)}{\sqrt{C_1^2(v)+2}}\right]vC_2(v)\right\},$$

$$v = \sigma\mu_0 a^2/(4t) ,$$

$$C_2(v) = \frac{3}{4}\pi^{1/2}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(2k-1)!!}{k!(k+2)!}\left(\frac{v}{2}\right)^k,$$

式中，D 为穿透深度，V 为“烟圈”扩散速度，a 为发射回线半径；σ 为半空间电导率。

对于某时刻 t_i，可用一个电流环的响应等效半空间地表上的瞬变电磁响应，该时刻的电流环就是镜像源位置。根据前人成果，t_i 时刻的镜像源位于 $g(t_i) = (1/\beta)\cdot D(t_i)$。对于一维层状大地，先用计算的视电阻率 $g(t_i)$ 作为初值，对计算镜像源的响应与实测瞬变电磁响应进行反演拟合，可准确确定镜像源的位置；最后根据镜像源位置求勘探深度：$h(t_i) = \alpha\cdot D(t_i)$，$\alpha$ 为经验系数，取值范围为0.4～0.44。

1.3 瞬变磁场拟二维反演成像算法

用瞬变磁场作拟二维反演成像，具体算法是：首先依据瞬变磁场全域电阻率公式计算视电阻率，再根据“烟圈”理论的涡流扩散速度计算视深度，然后对所得视电阻率和视深度值进行修正，最后应用有限长度的厚板程序，将横向同深度层的介质分成若干块有限长度的厚板状导电介质进行正演拟合，反复进行深度、电阻率校正，得到最终的深度—电阻率地电断面，确定地下电性结构分布。

万方数据

2　应用效果

为了检验瞬变磁场拟二维反演成像算法的实用性,首先用理论模型进行验算,然后用一条已知剖面的实测瞬变磁场数据进行拟二维反演成像,与传统的感应电动势反演结果及已知钻孔情况对比,验证其实际应用效果。

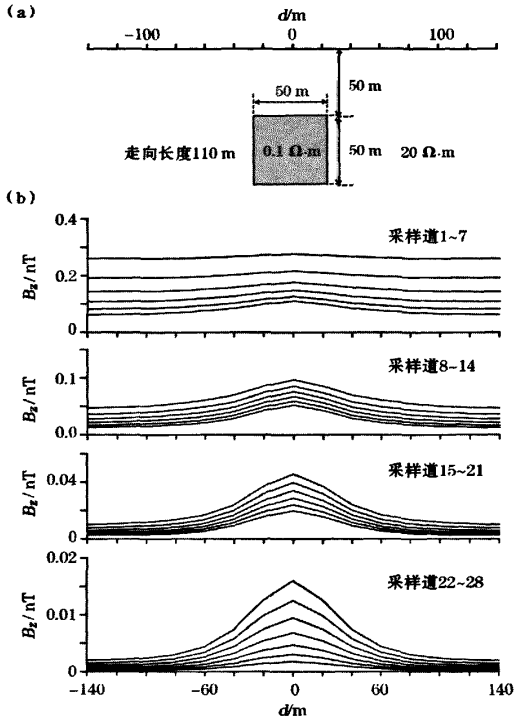

图 3　理论模型及三维正演瞬变磁场响应剖面曲线

2.1　理论模型验证

采用在均匀半空间中嵌入规则低阻体的模型(图 3a),利用吴广耀教授研究的瞬变磁场三维正演程序 STEM3D 进行正演数值模拟,结果见图 3b。

用三维正演模拟的瞬变磁场数据,作拟二维反演成像,得到的深度—电阻率断面结果见图 4。由图可见,有一明显的低阻异常显示,且与模型相对应,低阻异常体的中心位置及异常体形态与模型均相吻合。

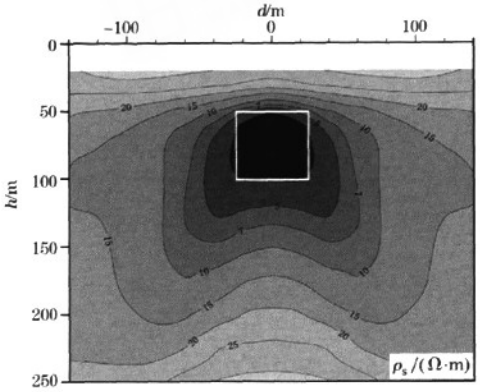

图 4　瞬变磁场拟二维成像电阻率断面

2.2　野外实际应用效果

选择某铜矿区的一条已知剖面开展了超导 TEM 试验。该剖面的 1 570 点钻探结果共见矿 7 层,最浅一层深约 82 m,最深一层为 252 m,累积厚度约 19.5 m,最厚一层厚 7.1 m,平均铜矿品位达 1.04%。采用中心回线装置,发射线框为 200 m × 200 m,测量点距 50 m,发射电流 15 A,每个测点分

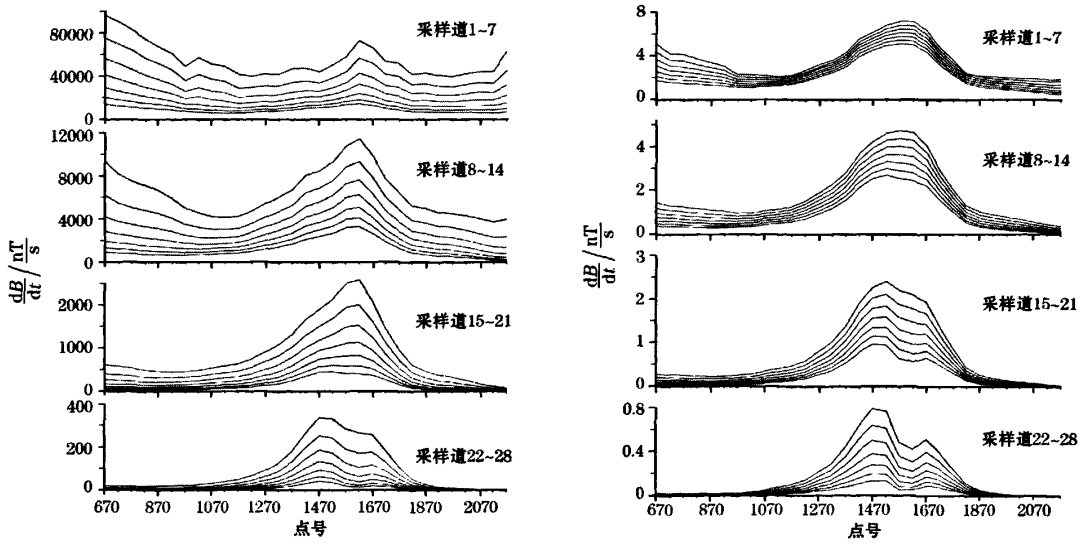

图 5　感应电动势(左)和瞬变磁场(右)响应剖面曲线

万方数据

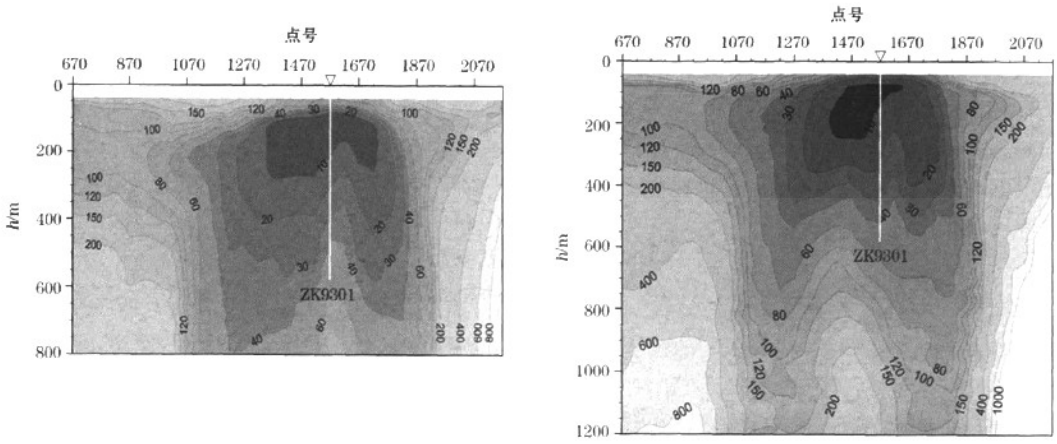

图 6 感应电动势(左)和瞬变磁场(右)的拟二维反演视电阻率断面

别用感应探头和超导探头测量感应电动势和瞬变磁场信号。图 5 为实测的感应电动势和瞬变磁场响应剖面曲线。分别对感应电动势和瞬变磁场数据做拟二维反演,得到如图 6 的电阻率拟断面。可以看出,采用瞬变磁场拟二维反演成像与传统的感应电动势拟二维反演成像所得到的结果相一致,且与实际钻孔验证情况基本吻合。

另外,由晚期感应电动势和瞬变磁场的表达式可以看出,晚期感应电动势 ε_z 随时间 $t^{-5/2}$ 衰减,而晚期瞬变磁场 h_z 随时间 $t^{-3/2}$ 衰减,瞬变磁场随时间的衰减速度比感应电动势慢。由图 5 所示的剖面曲线也可以明显看出,瞬变磁场衰减速度较慢,晚期信噪比强。所以在 TEM 测量中,观测瞬变磁场有效信号的采样时间明显比感应电动势长,从而能够明显增大 TEM 的勘探深度。

3 结语

通过对超导 TEM 瞬变磁场特征和变化规律的研究与讨论,进一步表明在瞬变电磁法测量中,直接测量瞬变磁场比测量感应电动势具有突出的优势:①瞬变磁场衰减慢,晚期信噪比强,能明显增大 TEM 的勘探深度;②由瞬变磁场定义的全域视电阻率有唯一解。通过对模型和实测数据的试算,瞬变磁场的拟二维反演成像结果都与实际情况相吻合。由此可见,拟二维反演成像方法是一种实用、有效的瞬变磁场反演解释方法,能够为推动超导 TEM 的实际应用提供有效的数据解释手段,为当前我国深部找矿工程提供先进、有效的方法技术支撑。

参考文献:

[1] 蒋邦远. 瞬变电磁法勘探[M]. 北京:地质出版社,1998.
[2] 考夫曼 A,凯勒 G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 王建谋译. 北京:地质出版社,1987.
[3] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990.
[4] 严良俊,徐世浙,等. 中心回线瞬变电磁测深法快速电阻率成像方法与应用[J]. 煤田地质与勘探,2002(6).
[5] 苏朱刘,胡文宝. 中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演方法[J]. 石油物探,2002(2).
[6] 翁爱华,刘国兴. 利用连分式定义瞬变电磁法全区视电阻率研究[J]. 煤田地质与勘探,2003(3).

THE HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY TEM TRANSIENT MAGNETIC FIELD PSEUDO-2D INVERSION AND ITS APPLICATION EFFECT

ZHANG Jie[1], LV Guo-yin[1], GUO Bu-ling[2], CHEN Xiao-dong[1], WU Jun-jie[1], WANG Xing-chun[1]
(1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, China*; 2. *Hebei Institute of Regional Geological Survey for Mineral Resources, Langfang 065000, China*)

下转 213 页

万方数据

THE APPLICATION OF DIGITAL SPECTROSCOPIC TECHNIQUE TO AIRBORNE GAMMA-RAY INVESTIGATION

ZENG Guo-qiang[1], GE Liang-quan[1], XIONG Sheng-qing[2], NI Wei-chong[3], LAI Wan-chang[1]

(1. *College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610051, *China*; 2. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing* 100083, *China*; 3. *Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang* 050002, *China*)

Abstract: Analog spectroscopy based on peak sampling and holding circuit cant realize the airborne spectral measurement that uses several large size NaI(Tl) crystals This system makes use of Y/U double channel digital controlled gain amplifier to adjust the spectral drift. The designed digital spectroscopy uses high speed ADC and CPLD to complete baseline restore and peak height acquisition, thus improving the energy resolution. With this method, the maximum pulse through output rate is 100 k/s, the spectral drift is ±1 channel, and the start energy is less than 20 keV. This system has low power dissipation, small volume and high reliability. It can be used to perform airborne spectra measurement.

Key words: airborne spectroscopic investigation; digital controlled gain amplifier; digital gamma-ray spectroscopy; baseline restore

作者简介:曾国强(1980 -),男,福建福鼎人,博士,讲师,主要从事核电子仪器开发的研究。

上接 208 页

Abstract: Theory and practice show that the observation of the transient magnetic field in the TEM has more advantages than that of the induced EMF. With the application and improvement of the high-temperature superconducting technology, the direct observation of transient magnetic field signal has become a reality in the TEM. However, the retrieve interpretation method for transient magnetic field data has become an urgent problem. In this paper, drawing on the interpretation method of the induced EMF, the authors made an overall explanation of the definition of apparent resistivity based on a study of the transient magnetic field and probed into the TEM transient magnetic field for PSEUDO-2D inverse technology. From the theoretical model and the measured data, the authors have verified the practicality of the method, which can provide technical support for the development of the high-temperature superconductor TEM method.

Key words: TEM; high-temperature superconductor; transient magnetic field; PSEUDO-2D inversion

作者简介: 张杰(1977 -),男,安徽滁州人,工程师,2009 年毕业于中国地质大学(北京),硕士,从事电磁法研究工作。

万方数据