瞬变电磁法在山东某金矿尾矿库安全隐患排查中的应用

张善法[1,2], 孟令顺[1], 杜晓娟[1]
1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026
2. 山东正元地理信息工程有限责任公司, 济南 250101

摘要: 尾矿库是矿山安全生产的重大危险源之一, 采空区的探测是尾矿库安全隐患排查治理的关键。为了验证应用瞬变电磁法探测采空区的有效性、研究其异常特征及获取此类异常的解释方法, 首先选择深度为11~106 m不等的3条已知巷道和1处已知隧道进行了现场模拟试验, 均取得明显的相对高阻异常反映; 然后根据模拟试验结果在尾矿库区布设了总长度2 975 m的10条探测剖面进行实测, 得到了相似的高阻异常结果; 最后选取数据处理后的Ⅰ、Ⅱ剖面作为实例, 进行了异常解释。试验研究表明, 瞬变电磁法应用于金矿尾矿库隐患查找是经济、快速、有效的, 甚至对深度小于20 m塌陷危害严重的"半盲区"也有明显的反映。

关键词: 瞬变电磁法; 尾矿库; 安全隐患; 采空区; 金矿
中图分类号: P631.325 文献标志码: A 文章编号: 1671-5888(2010)05-1177-06

Transient Electromagnetic Method to Investigating Potential Safety Hazard of Mine-Out Area in Tailings Pond of a Gold Mine

ZHANG Shan-fa[1,2], MENG Ling-shun[1], DU Xiao-juan[1]
1. *College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun* 130026, *China*
2. *Shandong Zhengyuan Geographic Information Engineering Co., Ltd, Jinan* 250101, *China*

Abstract: Tailings pond is one of the major hazard installations in safety production and the detection of mined-out areas is the key to investigate and control potential safety hazard to tailings pond. In order to verify the effectiveness of detection, explore the anomalous characteristics and obtain its interpretation with transient electromagnetic method (TEM). Firstly, three known tunnels, which depth is from 11 m to 106 m, and a tunnel are simulated on the spot and achieve all the anomaly response of high resistance correspondingly. Secondly, the 10 probe profiles of total 2 975 m length on ground of the tailings pond were laid depend on the simulation results and obtained a similar result of high resistance anomalies. Finally, the profiles No. Ⅰ and No. Ⅱ were taken as examples after the data processing, and the anomaly results were explained. According to the report of mineral exploration and the mining design, the results of interpreting agreed with location of ore occurrence and mining

收稿日期: 2009-12-26
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009GYXQ12-01)
作者简介: 张善法(1961—), 男, 山东沂水人, 博士研究生, 教授级高级工程师, 国家注册土木(岩土)工程师, 国家注册安全工程师, 主要从事地基基础工程检测、工程与安全环境地球物理及地质灾害评估等研究工作, Tel: 0531-66770750, E-mail: zhangshanfa@126.com
通讯联系人: 孟令顺(1946—), 男, 辽宁本溪人, 教授, 博士生导师, 主要从事固体地球物理重磁学方面的研究, E-mail: dtdxj@jlu.edu.cn。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

technology. The results show that TEM be applied to find hidden dangers of the tailings pond and detect mined-out area is economic, fast and effective, and this method even has an obvious response for the "semi-blind" area of less than 20 m depth if the collapse of the consequences will be serious.

Key words: TEM; tailings pond; potential safety hazard; mined-out areas; gold mines

0 前言

瞬变电磁法(TEM)是近年来电法勘探领域发展较快的一种重要方法。相对于其它地球物理方法, TEM 具有探测深度大、分辨率高、信息丰富等特点,已由早期的用于金属矿勘探发展到用于隐伏矿体勘探、煤矿采空区和陷落柱探测、隧道工程、大型水坝隐患探测等工程勘查领域。

随着国家矿产资源开采量的增加,金矿尾矿库下的采空区成为矿山开采过程中需要解决的突出问题。近 20 a 来,每年从地下开采出的矿石达 50 亿 t 之多,由此带来了两方面的问题:一是地下采空区面积越来越大,因未及时充填处理,破坏了生态平衡,引发了溃坝、塌陷等地质灾害;二是矿业开发产生了大量的尾矿,尾矿库成为矿山生产的必要设施。据国家安监总局[安监总管〔2009〕95 号]通报,我国 12 655座尾矿库中,危、险、病库达 4 910 座,其潜在危险对人民生命财产安全、生态环境威胁极大,因此尾矿库隐患排查、加固治理是当前矿山安全生产的重要任务。

胶东地区是我国历史悠久的黄金产地。该地区某金矿尾矿库位于矿区内山谷上游,坝高大于百米。矿区内多家生产、矿脉纵横交错,采空区极易贯通,而生产生活区位于库区百米以下,该库属重大危险源。探明库区内采空区是预防事故发生的必要措施。本文应用瞬变电磁法对尾矿库下采空区进行了探测,有效地圈定出采空区的位置。

1 瞬变电磁法探测采空区的原理及试验

1.1 瞬变电磁法用于探测采空区的可行性

采空区虽然分布在不同的深度、具有分层性,但单个采空区的形状可近似看成球体和水平圆柱体或它们的组合;因此可用球体或水平圆柱体作为单个采空区的模型。若将采空区作为球体来讨论,设球体半径为 a,球体埋深为 $h(h>a)$,电导率为 σ。在中心回线装置情况下,感应电动势为[1]

$$V(t)=3\pi\mu_0\frac{Ia^3R^2r^2}{(R^2+h^2)^{3/2}(r^2+h^2)^{3/2}\tau}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\exp(-n^2t/\tau)。\quad(1)$$

通常假设 R 和 r 分别为发送回线和接收回线的半径,$\tau=\mu_0\sigma a^2/\pi$。根据此式可得到球体的瞬变电磁响应。

当球体不在发射回线的正下方时,球体的电磁响应与水平距离的关系曲线[2]如图 1 所示。

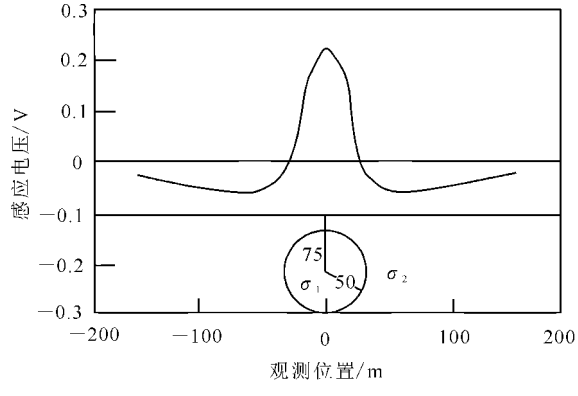

图 1 不同观测位置的电磁响应曲线[2]

Fig. 1 Electromagnetic response curve of different viewing positions

对不同时间道和不同观测位置的球体和水平圆柱体,通过物理模拟可以得到瞬变电磁相应[3-4],如图 2 所示。

从图 1、图 2 可以看出,感应异常主要反映在球体上方,而球体两侧电磁场值比较小。

瞬变电磁法(TEM)应用于尾矿库下采空区探测,其地球物理前提是采空区与围岩存在电阻率差异,围岩作为背景,采空区为局部异常。采用瞬变电磁法可以将采空区从背景中区分出来。为实现此目的,可以将实测的 $V(t)/I$ 瞬变衰减值,转换为视电阻率值。在库区采空区探测中,采用了全期视电阻率定义[5]进行视电阻率转换。对于发射回线边长为 L、接收回线边长为 l 的中心回线装置,其感应电动势[4]为

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

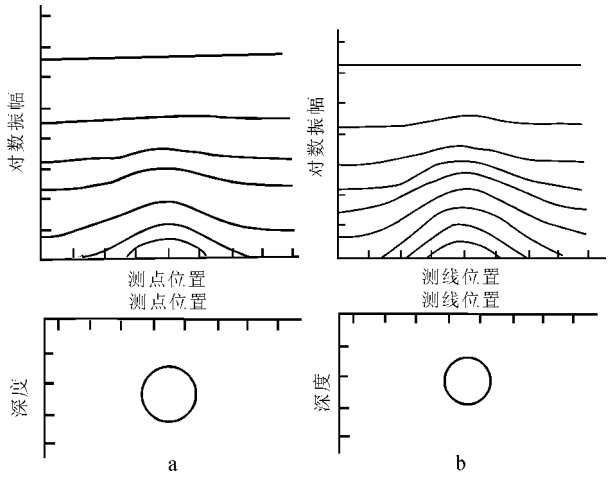

图 2　模型瞬变电磁响应示意图

Fig. 2　Transient electromagnetic response of model

a. 覆盖层与球体模型(埋深 50 m); b. 覆盖层与水平圆柱体模型(埋深 40 m)

$$V(t) = \frac{2I^2\mu_0}{tL}ly \text{ 。} \qquad (2)$$

视电阻率计算公式[4]为

$$\rho_s = \frac{\mu_0 L^2}{4\pi tx} \text{ 。} \qquad (3)$$

相应的视深度[4]为

$$h_a = \sqrt{\frac{\mu_0 L^2}{4\pi x}} \text{ 。} \qquad (4)$$

(3)、(4)两式中的 x 是参数, $x = \sigma\mu_0 L^2/4\pi t$, 可以通过定义(2)式中的 y, 然后分段求其反函数而求得 x。

瞬变电磁对目标的探测深度是应用该方法的前提条件。前人研究认为, 不同线圈大小和不同近地表电阻率值自感信号的穿透深度不同。线圈越大, 电阻率越高, 瞬变电磁可探测的最小深度越大; 线圈越小, 电阻率越小, 情况相反[6]。表 1 为不同线圈在不同电阻率情况下的最小探测深度。

综上所述, 瞬变电磁测深用于探测金矿尾矿库下采空区具有可行性。

1.2　瞬变电磁法现场模拟试验

为在采空区探测中应用瞬变电磁方法, 采用 WTEM－1Q 勘探系统, 选择已知的 3 条巷道、1 处隧道进行了现场模拟试验(模型参数及试验参数见表 2)。采用 IX1Dv3.36 软件进行原始数据处理, 将数值模拟[7－8]结果绘成视电阻率等值线拟断面图如图 3 所示。

表 1　不同线圈在不同电阻率情况下的最小探测深度[6]

Table 1　The minimum detection depth of the different coils in circumstances of different resistivity　m

线圈边长	ρ= 1 Ω·m	ρ= 10 Ω·m	ρ= 50 Ω·m	ρ= 100 Ω·m	ρ= 200 Ω·m
50 m × 50 m	3.16	10.00	22.36	31.60	44.72
100 m × 100 m	3.24	10.24	22.91	32.40	45.82
200 m × 200 m	3.31	10.48	23.45	33.16	46.90
600 m × 600 m	3.39	10.70	22.40	33.91	47.95

表 2　现场模拟试验参数

Table 2　Parameter of simulation test in field

模型名称	模型参数		装置类型	发射线圈	接收线圈	试验参数			点距/m
	截面尺寸/m	中心地面投影位置(埋深)/m				发射电压/V	发射电流/A	发射频率/Hz	
东山巷道(废弃)	< 2 m × 2 m	3(< 11)	重叠回线	3 m × 3 m 10 匝	3 m × 3 m 1 匝	7	10	32	0.5
东山巷道(生产)	2 m × 2 m	9.5(11)	重叠回线	3 m × 3 m 10 匝	3 m × 3 m 1 匝	7	10	32	0.5
旅游隧道	D14 半圆 + 14 m × 1 m	28(20)	重叠回线	2 m × 2 m 18 匝	2 m × 2 m 1 匝	7	10	32	2.0
苹果园巷道	2.5 m × 2 m	8.7(106)	大回线	100 m × 100 m 3 匝	PIT－40	≥530	20	4	0.3

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图3未进行深度校正,仅为减小图幅切去了两侧部分正常场。图3a为东山巷道模拟试验视电阻率高阻等值线图。由图可见,高阻等值线中心投影位置:废弃巷道距离地面3 m、生产巷道为9.5 m,与实际巷道轴线地面投影一致;而视深度废弃巷道为0.9 m、生产巷道为1 m,浅于实际深度较多。图3b为旅游隧道模拟试验视电阻率高阻等值线图,由图可见,异常范围为23~32 m,其中点与隧道实际轴线地面投影误差仅为0.5 m,而视深度近3 m,与实际深度差异较大。图3c为苹果园巷道模拟试验视电阻率高阻等值线图,由图可见,隧道表高阻等值线中心地面投影为9 m,与巷道轴线投影几近重合,但视深度为47 m,小于巷道实际深度。

由图3可见,已知巷道或隧道均有明显的相对高阻异常反映,且中心线地面投影与实际轴线基本一致。图3中还显示左侧塌陷巷道视电阻率较低、高值中心埋深相对较浅,说明左侧巷道岩体塌落、堆积松散;而右侧生产巷道岩体完整、试验地段近期无坍塌隐患,巷道使用正常,与现场实际相符。对比图中等值线高阻中心埋深与实际模型埋深发现,异常中心存在大幅度的"浅移"现象,实际目标体的埋深越浅,异常"浅移"越严重。

理论计算显示,瞬变电磁法对单纯低阻围岩中的高阻目标体无相应异常。综合模拟现场地质地球物理现状定性分析认为,本次模拟试验中两处巷道异常的产生原因与巷道顶部凝结的薄层矿化水有关,而干燥隧道异常与隧道支护中的钢筋网密切相关,探测深度"浅移"则与高阻目标体向上排斥感应电流有关,为较复杂的地电模型。未知区域的探测深度问题可以通过已知模型的试验资料进行深度校正。随着现场模拟试验资料的积累、理论研究的不断深入,此类模型的正反演定量解释精度将逐步提高。

现场试验表明,因地制宜地选择试验参数,瞬变电磁法对此类目标体探测是可行的。对于塌陷危害严重、小于20 m的浅部[9]采空区,取得了明显的相对高阻异常,而根据异常特征的差异可定性分析采空区的安全状态。3处现场模拟试验结果,不仅是拓宽现行技术规程[10]中适用范围的尝试,也是本次研究中瞬变电磁法应用于尾矿库库区安全隐患排查——采空区探测的主要依据。

2 瞬变电磁法在寻找尾矿库下采空区的应用

2.1 参数选择

根据库区现有的地质与地球物理资料,为增大勘探深度[11]、提高探测效果,参考苹果园模拟试验结果,选定发射频率4 Hz,发射峰值电压大于530 V,发射电流20 A。采用大定源回线法装置,发射线圈边长为300 m×300 m,采用PTT-40接收线圈,边长50 m×40 m;观测道数为31道,点距5 m,采样间隔16 μs,控制延时2.0 μs,60次迭加。

2.2 资料处理与解释

瞬变电磁法资料处理方法较多[12-14],本次研究采用IX1Dv3.36软件对野外采集的数据进行检查、格式解编、格式转换、剔除非值等处理工作,为减小图幅切去两端部分正常场,并据苹果园巷道模拟试验结果进行深度校正后绘制各测线的视电阻率等值线拟断面图。外业工作在尾矿库区布设了10条测线,总长2 975 m。现对其中两条测线的视电阻率拟断面图分析如下:

在Ⅰ测线,水平距离10~50 m、深度约120~190 m处以及水平距离110~130 m、深度约100~200 m处,存在两处视电阻率高值区域,如图4a所示。根据其异常特征、幅值,推测为采空塌落区,其中(15,-170)、(120,-190)为空洞,如图4b所示。

在Ⅱ测线,水平距离55~100 m、深度110~160 m处,水平距离160~170 m、深度约95~115 m处及水平距离230~270 m、深度约90~125 m处,各存在1处视电阻率相对高值区域,如图5a所示。推测为3处主要采空塌落区,其中,由浅至深(240,-95)、(255,-110)、(80,-125)、(70,-150)4点有空洞存在,如图5b所示。

定性分析10条剖面瞬变电磁异常形态及地质资料,推断结果如下:尾矿库区大部分区域地层较稳定;发现12处高阻异常,推断为采空区及采空塌落区,深度为70~360 m,地面投影面积约40~2 200 m^2,最大异常呈条带状分布,推断为沿主矿脉走向的采空塌落区,存在一定隐患,需验证后采取治理措施;其余异常主要为采空塌落松散堆积区,由异常形态及推断埋深可定性判断,这些区域处于静态稳定状态。综合研究矿产勘探报告及开采设计等资料后分析认为,瞬变电磁法探测高阻异常的解释结果与矿脉产状、矿体赋存位置基本一致,符合基本的开采

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

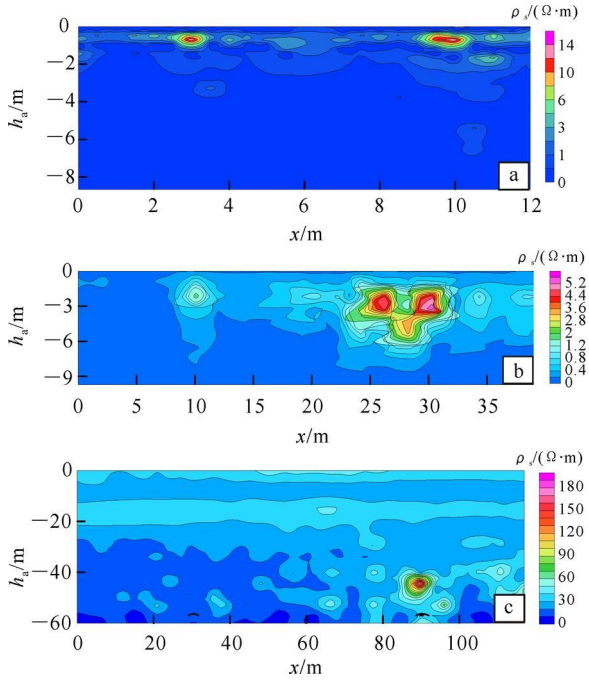

图 3　各巷道、隧道瞬变电磁法试验剖面

Fig. 3　Profile of transient electromagnetic test about mine roadways and road tunnel

a. 东山巷道; b. 旅游隧道; c. 苹果园巷道

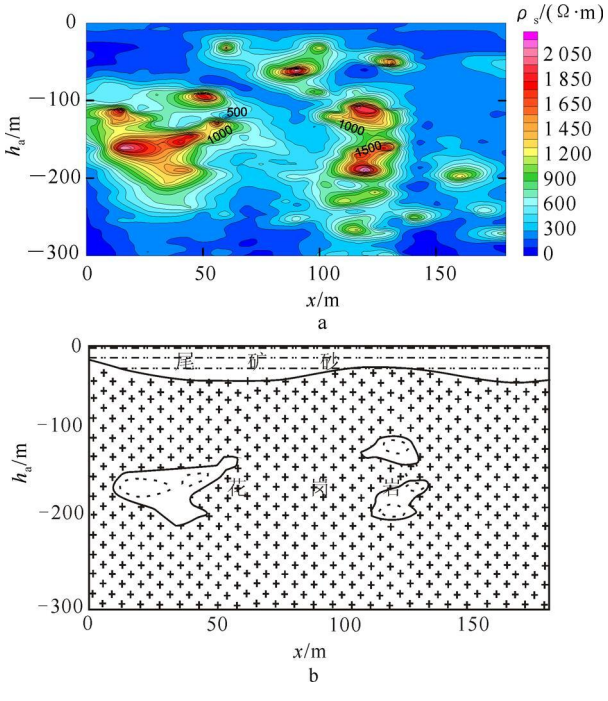

图 4　I 测线视电阻率 ρ_s 等值线拟断面(a)及解释剖面(b)

Fig. 4　The proposed sectional drawing of apparent resistivity contour ρ_s (a) and figure of inference and interpretation(b) of measuring line I

规律。

经验证后的采空区可转化为已知模型, 进一步校正推断结果, 将大大提高解释精度。注重此类模型资料的积累, 可为丰富理论定量解释奠定基础。

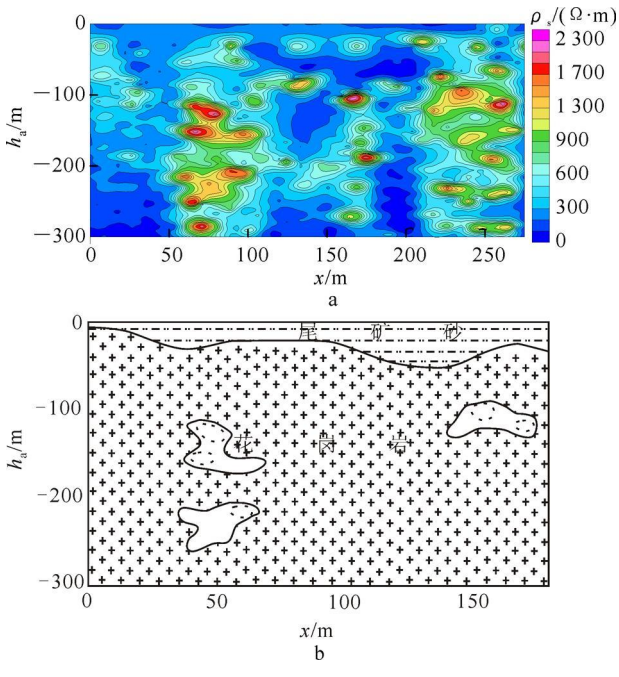

图 5　II 测线视电阻率 ρ_s 等值线拟断面(a)及解释剖面(b)

Fig. 5　The proposed sectional drawing of apparent resistivity contour ρ_s (a) and figure of inference and interpretation(b) of measuring line II

3　结论

(1) 瞬变电磁法用于良导电目标物勘查及地电测深是可行的, 应用于金矿尾矿库安全隐患排查中的采空区 ——高阻目标体探测取得了很好的效果。

(2) 对于塌陷可能造成严重后果的、深度小于 20 m 的浅部采空区, 瞬变电磁法测量也取得了明显的异常, 并可根据其异常形态、幅值大小、分布范围、埋藏深度及岩性等定性分析采空区塌陷危害严重程度。

(3) 瞬变电磁法具有方便快捷、效果直观、解释信息丰富的优点, 因地制宜地进行现场模拟试验, 选择合适的工作模式及参数, 可进一步提高解释精度。

参考文献(References):

[1]　牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

社, 2007.
NIU Zhi-lian. Time domain electromagnetic methods and theory[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.

[2] 薛国强, 宋建平, 闫述, 等. 瞬变电磁探测地下洞体的可行性分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(5): 135-138.
XUE Guo-qiang, SONG Jian-ping, YAN Shu, et al. Feasibility analysis of transient electromagnetic method for detecting underground cave[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2004, 28(5): 135-138.

[3] Ogilvy R D. A model study of the transient electromagnetic coincident loop technique[J]. Geoexploration, 1983, 21: 231-246.

[4] 闫述, 傅君眉, 李正斌. 瞬变电磁法探测地下洞体的有效性[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27: 64-68.
YAN Shu, FU Jun-mei, LI Zheng-bin. The availability of transient electromagnetic method in prospect of underground cave[J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27: 64-68.

[5] Spies B R, Raiche A P. Calculation of apparent conductivity for the transient electromagnetic (coincident loop) method using an HP267 calculator[J]. Geophysics, 1980, 45(7): 1197-1204.

[6] 薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 575-578.
XUE Guo-qiang. Discuss the detection depth of the transient electromagnetic sounding method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5): 575-578.

[7] 杨晓弘, 何继善. 频率域激发极化法有限元数值模拟[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(4): 681-684.
YANG Xiao-hong, HE Ji-shan. Numerical simulation of frequency-domain IP with FEM[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2008, 38(4): 681-684.

[8] 黄俊革, 阮百尧, 鲍光淑. 齐次边界条件下三维地电断面电阻率有限元数值模拟法[J]. 桂林工学院学报, 2002, 22(1): 11-14.
HUANG Jun-ge, RUAN Bai-yao, BAO Guang-shu. Fem under quantic-boundary condition for model ingresistivity on 3-D geoelectric section[J]. Journal of Guilin Institute of Tecnology, 2002, 22(1): 11-14.

[9] 闫述, 石显新, 陈明生. 瞬变电磁法的探测深度问题[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1583-1591.
YAN Shu, SHI Xian-xin, CHEN Ming-sheng. The probing depth of transient electromagnetic field method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(6): 1583-1591.

[10] DZ/T 0187—1997 地面瞬变电磁法技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
DZ/T 0187—1997 Technical specification for the ground transient electromagnetic method[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.

[11] 闫述, 陈明生, 傅君眉. 瞬变电磁场的直接时域数值分析[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 275-284.
YAN Shu, CHEN Ming-sheng, FU Jun-mei. Direct time-domain numerical analysis of transient electromagnetic fields[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(2): 275-284.

[12] Wang T, Hohmann G W. A finite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 1993, 58(6): 797-809.

[13] Oristaglio M L, Hohmann G W. Diffusion of electromagnetic fields into a two dimensional earth: a finite-difference approach[J]. Geophysics, 1984, 49(7): 870-894.

[14] 熊彬. 大回线瞬变电磁法全区视电阻率的逆样条插值计算[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(4): 515-519.
XIONG Bin. Inverse spline interpolation for the calculation of all-time resistivity for the large-loop transient electromagnetic method[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(4): 515-519.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net