

Di Q Y, Unsworth M, Wang M Y. 2.5-D CSAMT modeling with the finite element method over 2-D complex earth media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4):723 ~ 730

复杂介质有限元法 2.5 维 可控源音频大地电磁法数值模拟

底青云¹ Martyn Unsworth² 王妙月¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 Department of Physics, University of Alberta, Edmonton Albert Canada, T6G 2J1

摘 要 利用有限元 2.5 维可控源音频大地电磁法(简称 CSAMT)数值模拟方法,对 100Ωm 均匀半空间介质中有限长度的电偶极源产生的电场、磁场及视电阻率、相位特征进行了数值模拟,研究了场的空间变化规律。在一个象限中,场的特征存在双叶现象,当收发距大于 4 个趋肤深度时,电阻率较接近介质真实的电阻率,这些结果为观测系统和收发距的选择提供了依据。波数域场的特征表明,低波数对源的贡献占较大的比例。有限元法 2.5 维 CSAMT 数值模拟的优势在于能较准确地获得复杂介质结构的波场特征。本文结合直立异常体、倾斜异常体及断陷模型对 CSAMT 电阻率、相位剖面特征及频率曲线特征的可靠性进行了研究。数值模拟结果直观地给出了异常体的剖面异常形态。通过对比研究异常体的剖面异常形态和半空间场的特征进一步说明本文方法和软件在模拟复杂介质结构场特征时是可靠的。这为认识观测数据,指导反演解释提供了较好的依据。

关键词 复杂介质 2.5D 可控源音频大地电磁法 有限元法 数值模拟

文章编号 0001-5733(2004)04-0723-08 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2003-05-12, 2004-02-24 收修定稿

2.5-D CSAMT MODELING WITH THE FINITE ELEMENT METHOD OVER 2-D COMPLEX EARTH MEDIA

DI Qing-Yun¹ Martyn Unsworth² WANG Miao-Yue¹

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100029, China

2 Department of physics, University of Alberta, Edmonton Alberta, T6G 2J1, Canada

Abstract This paper discusses deeply the characteristics of EM field for 2-D complex earth media. We introduce the characteristics of electric field, magnetic field and apparent resistivity, and phase produced by a finite electrical dipole source over 100Ωm homogeneous half-space media. From this result we know the field change behavior over the distance from the transmitter to the receiver, and that we should use a proper transmitting-receiving mode. In wave number domain, the EM field shows that the field of low wave number contributes much more than that of high wave number. And then we demonstrate the CSAMT forward modeling apparent resistivity, phase pseudosections and frequency curves for two-anomaly bodies, two-lean-anomaly bodies and down faulted anomaly. Numerical modeling results show directly the anomaly characteristics. This is very helpful for recognizing field data and data inversion and interpretation.

Key words Complex earth media, 2.5-D, CSAMT, Finite element method, Numerical modeling.

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-134).

作者简介 底青云,女,1998 年于中国科学院地球物理研究所获博士学位,副研究员,从事电磁波正反演研究. E-mail: qyDi@mail.igcas.ac.cn

1 引言

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是浅层地球物理勘探的主要手段之一^[1-14]. 尽管随着计算机技术的飞速发展及数值算法水平的提高,各种电磁方法的数据处理水平亦有了较大提高,但与天然源的大地电磁测深法(MT)相比,CSAMT 资料处理技术的发展相对缓慢. 目前 MT 的资料处理主要采用二维技术,而 CSAMT 资料处理主要采用一维处理技术. 其主要原因,一是源的问题,MT 采用天然场源,由于天然场源离勘探区很远,采用无源电磁波波动方程的平面波理论就能解决问题,处理方法相对简单. 而 CSAMT 采用人工可控信号源,需要求解有源电磁波波动方程,因此处理方法相对复杂. 利用人工信号源可以得到比天然场源高质量的数据,并且可以在有人为干扰的地区工作. 但模拟人工源产生的电磁波本质上是一个三维有源电磁波传播问题,其波动方程的求解十分复杂. 目前用于均匀层状介质的积分解析解,只有当在远场(大于 4 个趋肤深度)区才具有平面波的特征. 在近场区(小于 1 个趋肤深度)场的特征与接收点到源的距离有关,与平面波有很大的差异,在数据处理时一般采用对低频作近场校正的方法. 其二,复杂介质结构中有源电磁波的传播特征在理论上没有完全解决,从而限制了 CSAMT 资料处理技术的发展.

了解复杂结构下 CSAMT 的电磁场特征是资料反演的前提条件,要求数值模拟有突破性的进展. 实际工作中常遇到这样一些问题:如在一定深度范围内煤系地层及相邻顶板灰岩中的含水构造及含水性问题;在 1km 深度范围内长隧道洞体通过区的薄弱地质结构问题;如断层,岩溶,节理密集带及其含水性等. 对此,建立一个数值模拟为基础的仿真系统是十分必要的.

关于 2.5 维电磁波场问题的有限元理论首次由 Coggon 提出^[15]. 在 1976 年 Stroyer^[16]用有限差分法实现了二维地球介质中垂直磁偶源激发的场的模拟,并成功地用于地下水资源的勘查^[17]. Lee^[18]、Lee 和 Morrison^[19]给出了磁偶源激发的二维地球介质的有限元解,他们的结果和解析解吻合得非常好. Everett^[20]描述了 2.5 维时间域的瞬变电磁场的解. Torres-verdin^[21]等提出了 2.5 维数值模拟的快速方法, Mistuhata^[22]提出了考虑地形和偶极源二维有限元方法. Unsworth 等^[23]提出了模拟二维地球介质又

考虑源的三维特征的 2.5 维有限元数值模拟系统,但他们主要把该方法用于海水及海底介质的模拟,重点讨论有限长度源激发的场的特征. 2003 年,我们用 2.5 维 CSAMT 数值模拟讨论了层状介质模型及地电结构已知的实际模型所得结果的可靠性. 本文参考海上 CSAMT 实例研究的经验^[23],开展对陆地介质有源电磁波的数值模拟.

2 均匀半空间场的特征

采用与实际中常用的激发-接收方式,定义 x 方向为地质结构走向方向, y 为倾向方向, z 垂直地面向上. 均匀半空间视为 $100\Omega\text{m}$ 的介质. 电偶极子源平行 y 轴,位于坐标原点. 在离坐标原点 10km 的空间范围内观测场的特征. 由于源平行于 y 轴,沿走向 x 的场为磁场分量 H_x , 平行 y 轴的场为电场 E_y . 图 1(图版 I)中展示了有限长(200m)电偶极源在 $100\Omega\text{m}$ 介质中,频率为 64Hz 时激发的 H_x 、 E_y 及视电阻率 ρ_s 和相位 φ 在第 I 象限的平面图. 图 1a 中平行电偶极子的场 E_y 显示了双叶特征,两叶被“零”区分开. “零”区是 E_y 的方向突变引起的,在“零”区 E_y 的值很小,与电偶极子源方向的夹角约 35° . E_y 方向的突变意味着 E_y 沿 y 轴方向由正变为负,在其他象限反之. 图 1b 为磁场 H_x 剖面,它具有与 E_y 类似的特征. 由于 H_x 及 E_y 剖面上的双叶现象,所以视电阻率 ρ_s 和相位 φ_s 结构较复杂. 从视电阻率平面图 1c 和相位平面图 1d 看出,在大于 4 倍的趋肤深度(600m 左右)区域,电阻率较接近真实的介质的电阻率($100\Omega\text{m}$),相位接近 45° . 它与均匀半空间的解析解的结果一致.

上述电磁场及相应视电阻率和相位的复杂特征表明,在实际工作中,我们必须选择合适的收发方式及收发距离,尽可能减小源的复杂特征引起的假异常. 上述特征告诉我们收发距应该大于 4 倍的趋肤深度,才能得到稳定的趋于背景的真解.

3 波数域场的特征

采用图 1 模型,发射源频率分别为 2048Hz, 512Hz 和 64Hz,位于原点但平行 y 轴的有限长度(200m)的电偶极子源. 接收点分别位于 $(x_1, y_1) = (8000\text{m}, 900\text{m})$, $(x_2, y_2) = (8000\text{m}, 1800\text{m})$, $(x_3, y_3) = (8000\text{m}, 4500\text{m})$. 图 2(A~C)(见图版 II)分

别为 3 个测点上电场、磁场随波数变化的特征曲线。图 2 中的(a,b)分别为电场的实、虚分量;图 2(c,d)分别为磁场的实、虚分量,由图可见在场值中低波数项的贡献占主导地位。利用傅氏反变换可以把不同频率不同波数的场转换回到空间域,从而可以得到三维场源特征的数值模拟结果。

4 复杂结构数值模拟

选择 3 个复杂介质结构模型的 2.5 维有限元场值的数值模拟,发射源位于坐标原点,接收测线平行发射偶极子在 x 方向 8km 处(图 3b,见图版 III)。模拟所用的参数如下:

接收点位置 y (m): 从 400 ~ 2100 点,点距为 100m,共 18 个点,从 2100 ~ 10000 点,点距为 200m 有 26 个点,共 44 个。

频率 f (Hz) 为: 2048, 1024, 512, 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1. 共 12 个。

波数 k (10^{-5} m^{-1}) 为: 1.78, 3.16, 5.63, 10.0, 17.8, 31.6, 56.3, 80.0, 100.0, 178.0, 316.0, 563.0, 1000.0, 2000.0, 5000.0. 共 15 个。

4.1 两个棱柱体模型

模型几何结构及收发关系见图 3(a,b)(见图版 III)。图 4(a,b)(见图版 IV)为图 3 模型在 44 个接收点上对应 12 个频率的视电阻率及相位断面图。无论是视电阻率还是相位断面图都非常清晰地展示了两个棱柱异常体的异常特征,异常的范围要大出异常体尺寸很多。为了展示频率曲线特征,我们给出了第 21 个接收点(2700m 处),第 27 个接收点(3900m 处),以及第 34 个接收点(5300m 处)的频率-视电阻率及频率-相位曲线。3 个点的位置见图 4(a,b)中的“▽”, R_x 表示接收点。比较图 4(c,e,g)(见图版 IV)的视电阻率曲线可以看出,在 21 号及 34 号接收点上,由于曲线通过棱柱体,所以在对数频率 0.5 ~ 2Hz 段视电阻率曲线呈现一个明显的低阻特征,而图 4e 曲线则非常平滑地渐变,没有低阻特征。3 个点上的相位曲线也有类似的特征,只是对应异常的位置相位相对变高。

4.2 两个倾斜异常体模型

为了了解更小异常体的响应特征,我们设计了宽度为棱柱体的宽度的 1/2 的两个倾斜异常体模型,如图 5(见图版 III)所示。异常体位于第三层 100Ωm 介质中。收发方式及接收点位置同图 3b。在视电阻率及相位断面图图 6a 和图 6b 上(见图版

III),对数频率 0.5 ~ 2Hz 段,水平位置 3500 ~ 6500m 段,两个倾斜异常体的形态非常清晰。3 个接收点 R_x 26(3700m), R_x 31(4700m)及 R_x 37(5900m)处的 $f\rho_s$ 曲线分别为图 6(c,e,g)(见图版 IV), $f-\phi$ 曲线分别为图 6(d,f,h)(见图版 IV)。在过异常的两个点 R_x 26 和 R_x 37 上呈现了低电阻率及高相位的特征, R_x 31 点上电阻率图 6e 及相位曲线图 6f 则是非常平滑的过渡,没有异常特征。

4.3 凹陷异常体模型

为了考核方法及软件的可靠性,设计了如图 7(见图版 III)所示的凹陷结构模型,结构的几何尺寸及各层电性参数已标在图中。激发和接收方式同图 3b(见图版 III)。

图 8(a,b)(见图版 I)和图 7(见图版 III)是模型的频率测深视电阻率及相位断面图。同样也得到了如两图上“▽”标识的 3 个测点 R_x 6(900m), R_x 13(1600m)及 R_x 25(3500m)处的 $f\rho_s$ 曲线分别见图 8(c,e,g), $f-\phi$ 曲线分别见图 8(d,f,h)(见图版 I)。对应凹陷位置 1500 ~ 2000m 处,无论是电阻率还是相位断面图都非常清楚地显示了凹陷的形态,尤其是视电阻率剖面上的异常形态非常容易识别。在相应的接收点 R_x 13 的 $f\rho_s$ 曲线图 8e 和 $f-\phi$ 曲线图 8f 上(见图版 I),对应频率 100 ~ 1000Hz 段,电阻率明显比图 8c 和图 8g 高,对应的相位则明显低,而更低频率的相应位置上断陷处电阻率比正常地层处低,相位则偏高。

5 讨论及结论

上述 3 个复杂结构模型的 2.5 维 CSAMT 数值模拟结果表明,无论是断面图还是单值频率测深曲线,对地下复杂介质的特征都有较明显地显示。低阻异常体在 $f\rho_s$ 图上对应较低的视电阻率异常,在 $f-\phi$ 图上对应稍高的相位异常。根据均匀半空间场的结构特征,收发距应大于 4 倍的趋肤深度,才能得到稳定的受近场影响小的高质量的数据。从波数域特征看,三维源的特征主要集中在低波数中。

2.5 维有限元法 CSAMT 正演模拟技术,通过把三维源离散成一系列的波数域场,从而达到模拟三维源的特征的目的。同时有限元法可以较灵活的实现复杂介质的模拟,因此该方法是一种仿真的 CSAMT 数值模拟技术,基于此种技术的数据反演才更具有实用意义。

参考文献

- [1] Di Q Y, Wang M Y, Shi K F, et al. CSAMT research survey for preventing water-bursting disaster in mining. Proceedings of the 106th SEGJ Conference. Tokyo: The Society of Exploration Geophysicists of Japan. 2002
- [2] Zonge K L, Ostrander A G, Emer D F. Controlled-source audio frequency magneto telluric measurements. In: Vozoff K ed., Magneto Telluric Methods. Soc. Expl. Geophys. Geophysics Reprint Series 5, 1986, 749 ~ 763
- [3] Basokur A T, Rasmussen T M, Kaya C, et al. Comparison of induced-polarization and controlled-source audio-magnetotellurics methods for massive chalcopryite exploration in a volcanic area. *Geophysics*, 1997, **62**(6): 1087 ~ 1096
- [4] Sandberg S K, Hohmann G W. Controlled-source audio-magnetotellurics in geothermal exploration. *Geophysics*, 1982, **47**(1): 100 ~ 116
- [5] Batrel L C, Jacobson R D. Results of a controlled-source audio frequency magneto telluric survey at the Puhimau thermal area, Kilauea Volcano, Hawaii. *Geophysics*, 1987, **52**(4): 665 ~ 677
- [6] Wannamaker P E. Tensor CSAMT survey over the sulphur springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, U.S.A., Part I: Implications for structure of the western caldera. *Geophysics*, 1997a, **62**(4): 451 ~ 465
- [7] Wannemcker P E. Tensor CSAMT survey over the sulphur springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico. U.S.A., Part II: Implications for CSAMT methodology. *Geophysics*, 1997b, **62**(4): 466 ~ 476
- [8] Zonge K L, Figgins S J, Hughes L J. Use of electrical geophysics to detect sources of groundwater contamination. 55th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., *Expanded Abstracts*, 1985, 147 ~ 149
- [9] 底青云, 王妙月, 石昆法等. 高分辨 V6 系统在矿山顶板湧水隐患中的应用研究. *地球物理学报*, 2002, **45**(5): 1 ~ 5
Di Q Y, Wang M Y, Shi K F et al. An applied study on prevention of water bursting disaster in mines with the high resolution V6 system. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(5): 1 ~ 5
- [10] 吴瑞萍, 石昆法. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究. *地球物理学报*, 1996, **39**(5): 712 ~ 717
Wu L P, Shi K F. Applied study on underground water exploration with CSAMT method. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1996, **39**(5): 712 ~ 717
- [11] 吴瑞萍, 石昆法. 松山地下热水勘探及成因模式探讨. 物探与化探, 1995, **20**(4): 309 ~ 315
Wu L P, Shi K F. Geothermal exploration in Songshan and the study for its formulation. *Geophysics and Geochemical Prospecting* (in Chinese), 1995, **20**(4): 309 ~ 315
- [12] 于昌明. CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用. *地球物理学报*, 1998, **41**(1): 133 ~ 138
Yu C Y. Application on gold mineral exploration with CSAMT method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, **41**(1): 133 ~ 138
- [13] 石昆法著. 可控源音频大地电磁法理论与应用. 北京: 科学出版社, 1999
Shi K F. The theory and application of CSAMT method. Beijing: Science Press, 1999
- [14] Mitsuhashi Y, Toshihito U, Hiroshi A. 2.5D inversion of frequency-domain electromagnetic data generated by a grounded-wire source. *Geophysics*, 2002, **67**(6): 1753 ~ 1768
- [15] Coggon J H. Electromagnetic and electrical modeling by the finite-element method. *Geophysics*, 1971, **36**(1): 132 ~ 155
- [16] Snyder D D. A method for modeling the resistivity and induced polarization response of two-dimensional bodies. *Geophysics*, 1976, **41**(5): 997 ~ 1015
- [17] Stoyer C H. Numerical solution of the response of a 2-D earth to an oscillating magnetic dipole source with application to a ground water study. [Ph. D. thesis], Pennsylvania: Pennsylvania State Univ., 1975
- [18] Lee K H. Electromagnetic scattering by a two-dimensional inhomogeneity due to an oscillating dipole source. [Ph. D. thesis]. Berkeley: Univ. of California, 1978
- [19] Lee K H, Morrison H F. A numerical solution for the electromagnetic scattering by a two-dimensional inhomogeneity. *Geophysics*, 1985, **50**(6): 1163 ~ 1165
- [20] Everett M E. Mid-ocean ridge electromagnetics. [Ph. D. thesis], Toronto: Univ. of Toronto, 1990
- [21] Torres-verdin C, Habashy T M. Rapid 2.5-D forward modeling and inversion via a new nonlinear scattering approximation. *Radio science*, 1994, **29**(3): 1051 ~ 1079
- [22] Mitsuhashi Y. 2-D electromagnetic modeling by finite-element method with a dipole source and topography. *Geophysics*, 2002, **65**(1): 1 ~ 11
- [23] Unsworth J M, Bryan J T, Alan D C. Electromagnetic induction by a finite electric dipole source over a 2-D earth. *Geophysics*, 1993, **58**(2): 198 ~ 214

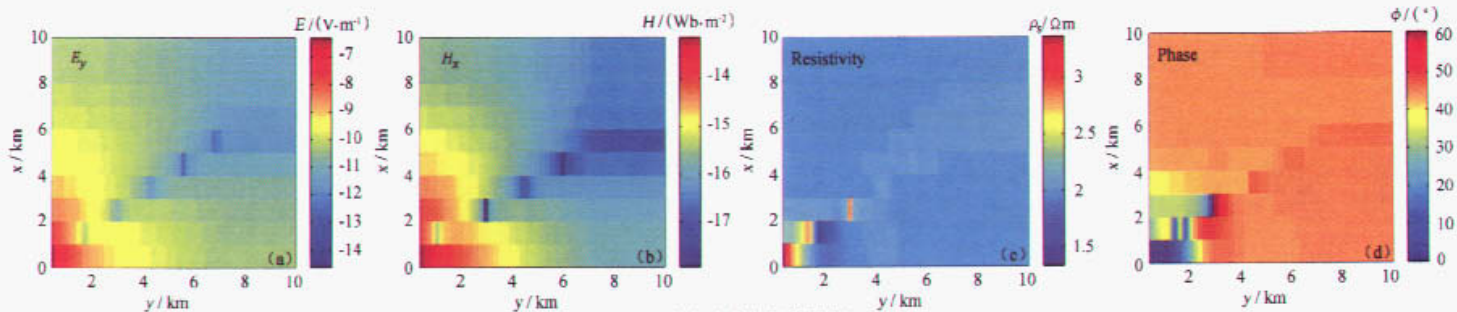
图版 I
Plate I

图1 均匀半空间场的特征

(a) 电场强度 E ; (b) 磁感应强度 H ; (c) 视电阻率 ρ_a ; (d) 相位 ϕ .

Fig.1 EM field profile of homogeneous half-space

(a) Electric field; (b) Magnetic field; (c) Apparent resistivity; (d) Phase.

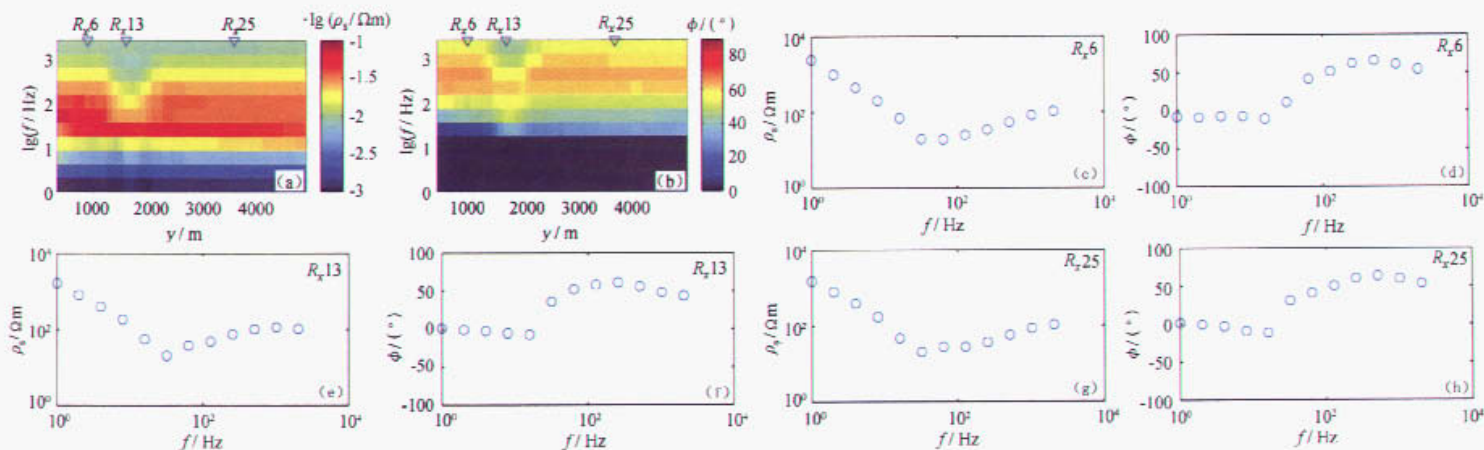


图8 图7模型的模拟结果

(a) 视电阻率断面图; (b) 相位断面图; (c), (e), (g) $f-\rho_a$ 曲线; (d), (f), (h) $f-\phi$ 曲线.

Fig.8 Forward modeling results for Figure 7 model

(a) apparent resistivity pseudosection; (b) phase pseudosection; (c), (e), (g) curve $f-\rho_a$; (d), (f), (h) curve $f-\phi$.

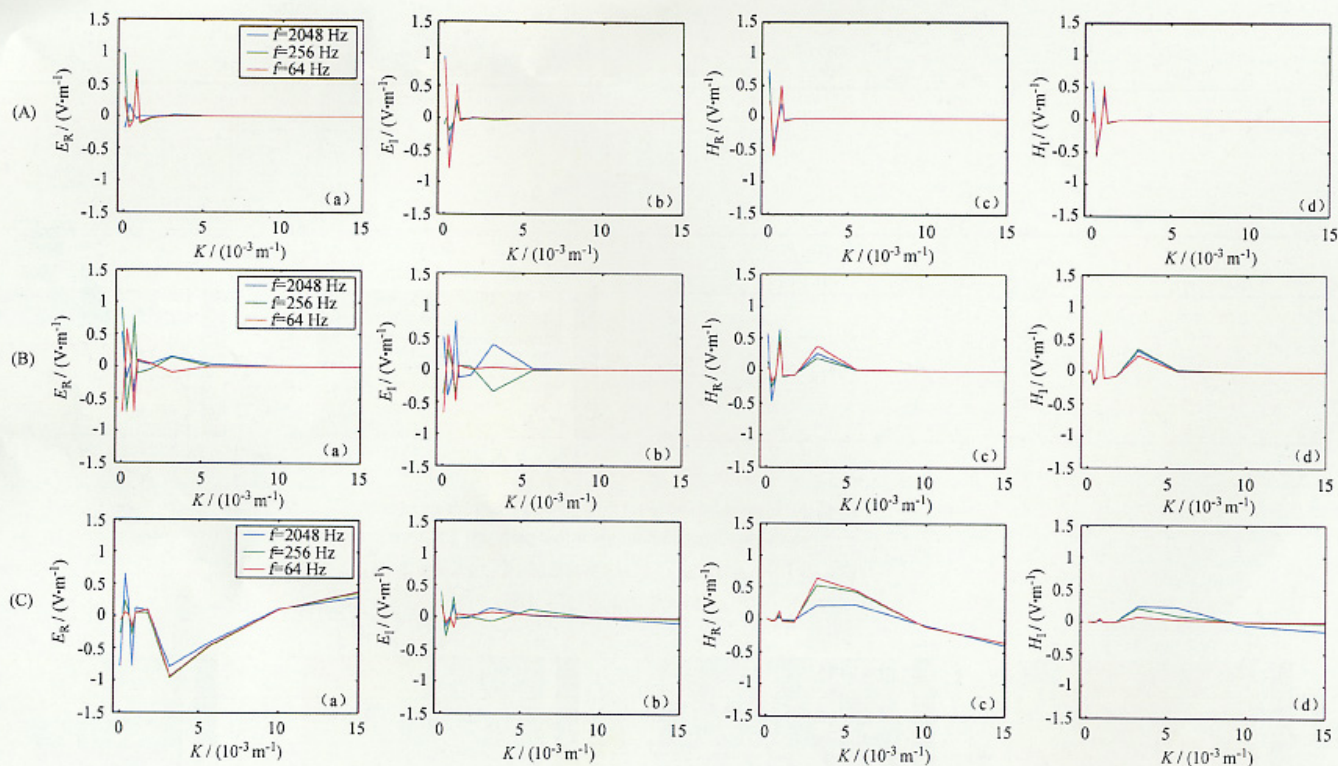
图版 II
Plate II

图2 均匀半空间波数域场的特征曲线

(A) $y=900\text{m}$; (B) $y=1800\text{m}$; (C) $y=4500\text{m}$.

(a) 波数-电场的实分量; (b) 波数-电场的虚分量; (c) 波数-磁场的实分量; (d) 波数-磁场的虚分量.

Fig.2 EM field curve of homogeneous half-space in wave number domain

(A) $y=900\text{m}$; (B) $y=1800\text{m}$; (C) $y=4500\text{m}$.

(a) Wave number-real component of electric field; (b) Wave number-imaginary component of electric field;

(c) Wave number-real component of magnetic field; (d) Wave number-imaginary component of magnetic field.

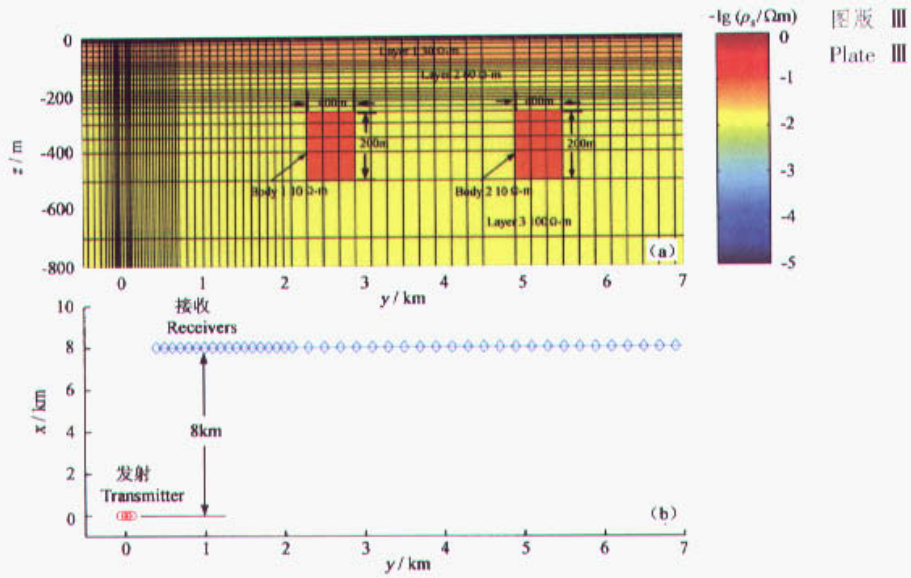


图3 两个棱柱体模型几何结构及收发方式图
(a) 模型几何结构; (b) 发射源和接收位置关系图。

Fig.3 Model geometry for two-anomaly bodies and the relative position of Transmitter and Receivers
(a) Model geometry ; (b) The relative position of Transmitter and Receivers.

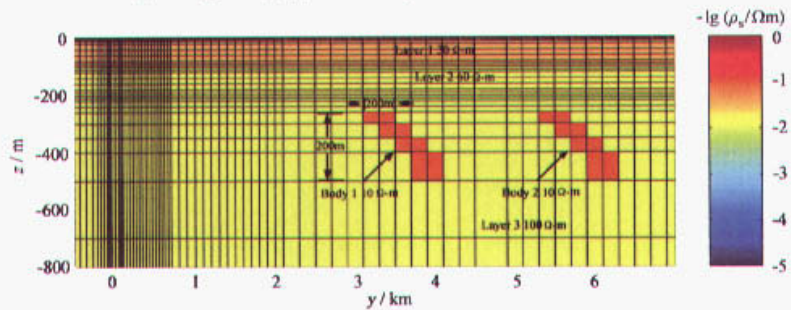


图5 两个倾斜异常体模型几何结构图
Fig.5 Model geometry for two-lean-anomaly

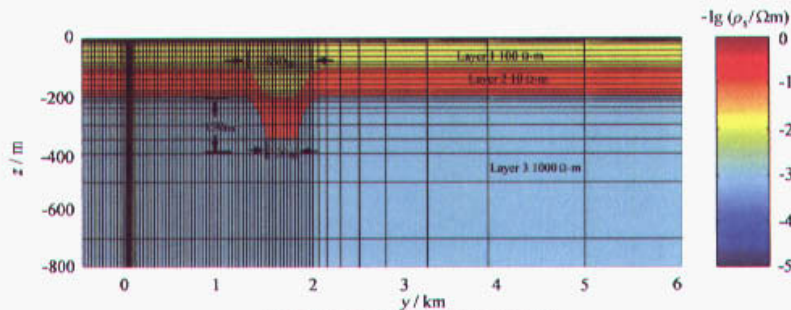


图7 断陷异常体模型几何结构图
Fig.7 Model geometry for down faulted anomaly

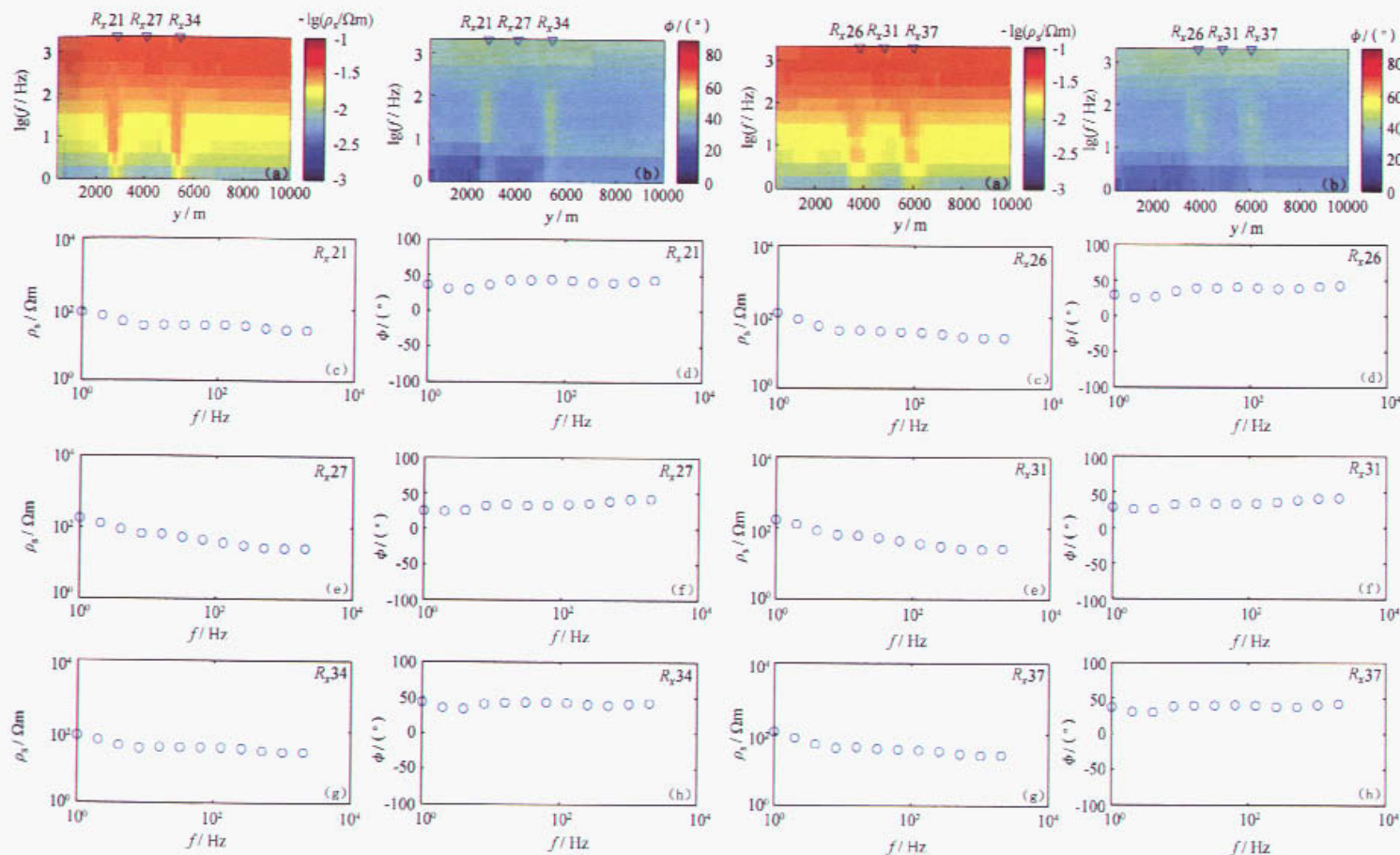
图版 IV
Plate IV

图4 图3模型的模拟结果

(a) 视电阻率断面图; (b) 相位断面图; (c), (e), (g) $f-\rho_s$ 曲线; (d), (f), (h) $f-\phi$ 曲线.

Fig.4 Forward modeling results for Figure 3 model

(a) apparent resistivity pseudosection; (b) phase pseudosection;

(c), (e), (g) curve $f-\rho_s$; (d), (f), (h) curve $f-\phi$.

图6 图5模型的模拟结果

(a) 视电阻率断面图; (b) 相位断面图; (c), (e), (g) $f-\rho_s$ 曲线; (d), (f), (h) $f-\phi$ 曲线.

Fig.6 Forward modeling results for Figure 5 model

(a) apparent resistivity pseudosection; (b) phase pseudosection;

(c), (e), (g) curve $f-\rho_s$; (d), (f), (h) curve $f-\phi$.