

殷长春, 张博, 刘云鹤等. 2015. 2.5 维起伏地表条件下时间域航空电磁正演模拟. 地球物理学报, 58(4):1411-1424, doi:10.6038/cjg20150427.

Yin C C, Zhang B, Liu Y H, et al. 2015. 2.5-D forward modeling of the time-domain airborne EM system in areas with topographic relief. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(4):1411-1424, doi:10.6038/cjg20150427.

## 2.5 维起伏地表条件下时间域航空电磁正演模拟

殷长春, 张博\*, 刘云鹤, 蔡晶

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

**摘要** 时间域航空电磁作为一种高效地球物理勘探技术特别适合我国地形复杂地区(沙漠、高山、湖泊、沼泽等)资源勘查. 然而, 这些地区地形起伏较大, 对航空电磁响应有严重影响, 忽略地形影响会给航空电磁数据解释造成很大误差. 到目前为止人们对航空电磁地形效应特征研究十分有限. 本文提出了基于非结构化网格的有限元法模拟带地形时间域航空电磁系统响应. 该方法与基于结构化网格的有限差分相比能更好地模拟地形. 首先通过傅里叶变换将 2.5 维问题转化成二维问题, 利用伽辽金方法对二维问题进行离散. 通过使用 MUMPS 求解器, 得到波数域电磁响应. 利用反傅里叶变换将波数域电磁响应变换到空间域, 并利用正弦变换将其变换到时间域, 得到 2.5 维时间域航空电磁响应. 通过将本文的计算结果与半空间模型解析解及其他已发表的结果进行对比, 检验了本文算法的精度. 最后, 我们系统分析了山峰和山谷地形对航空响应的影响特征. 本文研究结果对航空电磁地形效应的识别和校正具有指导意义.

**关键词** 航空电磁; 2.5 维; 正演; 地形效应; 非结构有限元法

doi:10.6038/cjg20150427

中图分类号 P631

收稿日期 2014-04-29, 2015-01-12 收修定稿

### 2.5-D forward modeling of the time-domain airborne EM system in areas with topographic relief

YIN Chang-Chun, ZHANG Bo\*, LIU Yun-He, CAI Jing

*College of Geo-exploration Sciences and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China*

**Abstract** As an effective and efficient geophysical tool, airborne electromagnetic (AEM) has been widely used in many fields such as geological mapping, hydrocarbon and mineral exploration, and environmental and engineering surveys. AEM data interpretation commonly uses a horizontally layered earth model. However, in rugged mountain areas, the topography relief can pose serious effects on AEM survey data, resulting in the distortion of AEM inversion results. The study of the topographic effect on AEM systems has attracted much attention worldwide, but most work has focused on frequency-domain EM systems, little for time-domain airborne EM systems. This paper presents an effort to address this issue.

The finite-element (FE) method based on an unstructured grid is used to simulate 2.5-D AEM responses for a topographic earth. We adopt this method, because it can calculate the AEM

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41274121)、国家青年基金项目(41404093)、国家重大科研装备研究项目(ZDYZ2012-1-03, 20130523MTEM05)、中国地质大学(武汉)地球内部多尺度成像湖北省重点实验室开放基金项目(SMIL-2014-03)和国家青年科学基金(41404057)联合资助.

**作者简介** 殷长春, 男, 1965 年生, 教授, 国家“千人计划”特聘专家, 主要从事电磁勘探理论, 特别是航空和海洋电磁方面的研究.

E-mail: yinchangchun@jlu.edu.cn

\* **通讯作者** 张博, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事航空电磁正反演研究. E-mail: em\_zhangbo@163.com

responses of complex models, while the unstructured grid can very well simulate the topography. To avoid the singularity, we divide the electromagnetic field into a background field and a secondary field. We apply the Fourier transform to Maxwell's equations to transform a 2.5D problem into a 2D problem and solve it in the wavenumber domain. On the outside boundaries, we assume the field vanishes. We use the Galerkin method to discretize the Maxwell equations and solve the final FE equations by the MUMPS solver.

To check the accuracy of our algorithm, we compare our results with both analytical results and those from the literature. After that, we calculate the responses of model 1) with only topography; 2) with both topography and one anomaly body; and 3) with both topography and multiple anomaly bodies both in the frequency-domain and time-domain. Finally, we calculate the relative AEM responses of abnormal bodies and topography for both the frequency and time domains to investigate the influence of topography on AEM system responses.

Topography has serious effects on the responses of airborne EM systems, especially in the high-frequency range or early time-channels. Numerical experiments show that close to the node points of the topography, AEM responses are demonstrated by sharp changes. Special attention need to be paid to the topographic effect when interpreting AEM survey data over rugged topographic areas. Besides, the topographic effect mainly occurs at the high frequency end and early time-channels, the EM responses of underground conductors mainly occur at low frequencies and later time-channels. These features provide the theoretical basis to identify the responses from the targets and the topography, so that the topographic effect on the AEM system responses can be corrected.

**Keywords** Airborne EM; 2.5-D; Forward modeling; Topographic effect; Unstructured finite-element method

## 1 引言

航空电磁法作为一种经济、高效的勘探手段在地质填图、油气勘探、矿产普查及环境和工程调查等方面得到了广泛应用。航空电磁解释通常使用水平层状模型(Yin and Hodges, 2007; Siemon et al., 2009; Vallee and Smith, 2009; 蔡晶等, 2014)。近年来,地形对航空电磁响应的影响吸引了世界范围内众多学者的关注。Liu 和 Becker(1992)使用边界元方法计算了带地形频率域航空电磁响应; Newman 和 Alumbaugh(1995)使用有限差分法模拟了二维和三维简单地形的频率域航空电磁响应; Avdeev 等(1998)使用积分方程法模拟了三维航空电磁响应; Sasaki 和 Nakazato(2003)计算了二维和三维带地形频率域航空电磁响应。然而,所有这些研究都是针对频率域问题,对于带地形时间域航空电磁正演模拟研究较少。随着时间域航空电磁法越来越广泛地应用于地球物理勘查,各种解释手段也得到迅速发展,地形对电磁响应的影响不容忽视(Annetts et

al., 1998; Liu and Becker, 1992; Mitsuhashi, 2000; Baba and Seama, 2002; Sasaki and Nakazato, 2003; Nam et al., 2007; 刘云鹤和殷长春, 2013; 蔡晶等, 2014)。

带地形航空电磁响应可以利用各种数学方法进行模拟。边界元法虽然可以模拟起伏地形,但不适用于复杂模型;有限差分法模拟带地形航空电磁响应时必须使用规则的楼梯来模拟起伏地形。为了更好地拟合地形,必须进行精细网格划分,从而导致了计算资源的较大浪费。为解决以上问题,本文提出了一种基于非结构化网格的有限元方法模拟带地形时间域航空电磁响应。为了把 2.5 维问题转化为二维问题,对麦克斯韦方程进行傅里叶变换并在波数域中对其进行求解。我们使用伽辽金方法(金建铭, 1998; 张继锋等, 2013)将波数域中的物理方程离散化,并利用 MUMPS 求解器求解离散后的有限元方程。通过与半空间模型的解析结果以及和已发表文献模型结果进行对比验证本文的算法精度。最后,我们以水平共面(HCP)和直立共轴(VCA)装置系统为例,分析了山峰和山谷地形对航空电磁响应的影响特征。

## 2 正演算法

为了避免奇异性,我们将电磁场分解成背景场和二次场进行求解.二次场满足如下形式的麦克斯韦方程:

$$\nabla \times \mathbf{E}^s = i\omega\mu_0 \mathbf{H}^s, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^s - \sigma \mathbf{E}^s = \sigma_s \mathbf{E}^p, \quad (2)$$

式中  $\sigma$  表示电导率,  $\sigma_s = \sigma - \sigma_p$  ( $\sigma_p$  表示背景电导率),  $\mathbf{E}^p$  表示背景电场(本文使用源在全空间的电磁响应作为背景场).

将式(1)和(2)按分量展开并假设  $x$  轴沿走向方向,对  $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$  各分量以及(1)(2)式中的右端源项在  $x$  方向进行傅里叶变换,可得到波数域中麦克斯韦方程组:

$$\frac{\partial \hat{E}_z^s}{\partial y} - \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} = i\omega\mu_0 \hat{H}_x^s, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial z} - ik_x \hat{E}_z^s = i\omega\mu_0 \hat{H}_y^s, \quad (4)$$

$$ik_x \hat{E}_y^s - \frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial y} = i\omega\mu_0 \hat{H}_z^s, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \hat{H}_z^s}{\partial y} - \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} - \sigma \hat{E}_x^s = \sigma_s \hat{E}_x^p, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial z} - ik_x \hat{H}_z^s - \sigma \hat{E}_y^s = \sigma_s \hat{E}_y^p, \quad (7)$$

$$ik_x \hat{H}_y^s - \frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial y} - \sigma \hat{E}_z^s = \sigma_s \hat{E}_z^p. \quad (8)$$

对(3)–(8)式进行化简,消去  $y$  和  $z$  方向的电、磁场分量,得到波数域中电磁场  $x$  分量满足的耦合方程

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left( \frac{\sigma}{k_e^2} \nabla \hat{E}_x^s \right) - \sigma \hat{E}_x^s - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial y} \right) \\ = - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{ik_x \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_y^p \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{ik_x \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_z^p \right) + \sigma_s \hat{E}_x^p, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left( \frac{\tilde{\sigma}}{k_e^2} \nabla \hat{H}_x^s \right) - \tilde{\sigma} \hat{H}_x^s - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial y} \right) \\ = - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tilde{\sigma} \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_y^p \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tilde{\sigma} \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_z^p \right), \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $\hat{\cdot}$  表示波数域场,  $k_x$  表示沿  $x$  方向的波数,  $\tilde{\sigma} = i\omega\mu_0$ ,  $k_e^2 = k_x^2 - \tilde{\sigma}$ .

为了得到离散化有限元方程,我们将整个计算区间划分成小单元,并使用伽辽金方法得到每个小三角形单元对应(9)和(10)式的弱形式

$$\int_{\Omega} N^e \left[ \nabla \cdot \left( \frac{\sigma}{k_e^2} \nabla \hat{E}_x^s \right) - \sigma \hat{E}_x^s - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{ik_x \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_y^p \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{ik_x \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_z^p \right) - \sigma_s \hat{E}_x^p \right] d\Omega = 0, \quad (11)$$

$$\int_{\Omega} N^e \left[ \nabla \cdot \left( \frac{\tilde{\sigma}}{k_e^2} \nabla \hat{H}_x^s \right) - \tilde{\sigma} \hat{H}_x^s - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{ik_x}{k_e^2} \frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tilde{\sigma} \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_y^p \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\tilde{\sigma} \sigma_s}{k_e^2} \hat{E}_z^p \right) \right] d\Omega = 0, \quad (12)$$

式中  $N^e$  为小单元对应的基函数(徐世浙,1994).

(11)和(12)式的矩阵形式如下:

$$\mathbf{K}_{1e}^1 \cdot \{ \hat{E}_{xe}^s \} + \mathbf{K}_{2e}^1 \cdot \{ \hat{E}_{xe}^s \} - \mathbf{K}_{3e}^1 \cdot \{ \hat{H}_{xe}^s \} = \mathbf{B}_{1e}^1 + \mathbf{B}_{2e}^1, \quad (13)$$

$$\mathbf{K}_{1e}^2 \cdot \{ \hat{H}_{xe}^s \} + \mathbf{K}_{2e}^2 \cdot \{ \hat{H}_{xe}^s \} + \mathbf{K}_{3e}^2 \cdot \{ \hat{E}_{xe}^s \} = -\mathbf{B}_{1e}^2, \quad (14)$$

其中  $\mathbf{K}_e$  是  $3 \times 3$  的小矩阵,  $\mathbf{B}_e$  表示源向量.将所有小单元对应的系数矩阵  $\mathbf{K}_e$  和右端的源向量组合起来,并假设当外边界足够远时,场值为零 ( $\hat{E}_x^s = 0$ ,  $\hat{H}_x^s = 0$ ), 得到

$$\mathbf{K} \mathbf{e} = \mathbf{b}, \quad (15)$$

式中  $\mathbf{K}$  表示整体刚度矩阵,  $\mathbf{e}$  表示待求解的波数域中的电磁场,  $\mathbf{b}$  表示源项.利用 MUMPS 求解器在求解方程时,将系数矩阵的分解与方程求解分开处理.当方程系数矩阵不变而仅源项变化时可以快速重复求解方程,因而特别适合求解航空电磁正反演问题.

使用 MUMPS 求解器求解方程(15),可以得到各个节点上的  $\hat{E}_x^s$  和  $\hat{H}_x^s$ , 其他场分量可以由这两个分量的导数求得 (Mitsuhata, 2000; 范翠松等, 2014). 利用反傅里叶变换可以得到空间域的电磁场值(徐世浙, 1988; Yin et al., 2008; 范翠松, 2013; 底青云等, 2004), 进而利用正弦变换(等价于 0.5 阶汉克尔变换), 可得到时间域航空电磁系统响应

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(\omega)}{-i\omega} e^{i\omega t} d\omega, \quad (16)$$

$$\text{或 } h(t) = -\sqrt{\frac{2t}{\pi}} \int_0^{\infty} \text{Re} \left[ \frac{H(\omega)}{\sqrt{\omega}} \right] J_{1/2}(\omega t) d\omega, \quad (17)$$

其中,  $J$  表示贝塞尔函数.

## 3 结果验证

下面我们将本文模拟结果与 Sasaki 和 Nakazato

(2003)使用有限差分计算的二维带地形频率域航空电磁响应进行对比,以验证本文算法精度;对于时间域航空电磁系统,我们将本文的结果与半空间模型的半解析解进行对比.图 1a 给出 Sasaki 和 Nakazato(2003)计算的梯形山峰模型(简称模型一).山峰高 50 m,顶部和底部分别宽 20 m 和 220 m;模型的电阻率为  $100 \Omega\text{m}$ ;收发装置采用水平共面装置,收发距 10 m,发射频率为 16 kHz,飞行高度固定为 30 m.图 1b 给出了本文模拟结果与 Sasaki 和 Nakazato(2003)给出结果之间的比较,图 1c 给出两者之间的相对误差.从图中

可以看出,两者吻合较好,最大相对误差不超过 3%.

由于带地形模型时间域航空电磁响应正演模拟结果发表的较少,本文将计算结果与半空间模型的半解析解(殷长春等,2013)进行比较.收发装置采用水平共面装置,收发距为 10 m,地下电阻率为  $10 \Omega\text{m}$ ,飞行高度为 30 m.发射波形为阶跃波.正演模拟结果对比如图 2a 和 2c 所示,相对误差如图 2b 和 2d 所示.从图中可以看出,两组模拟结果的最大相对误差不超过 1.5%.由此得出结论:本文的正演模拟方法具有较高的计算精度.

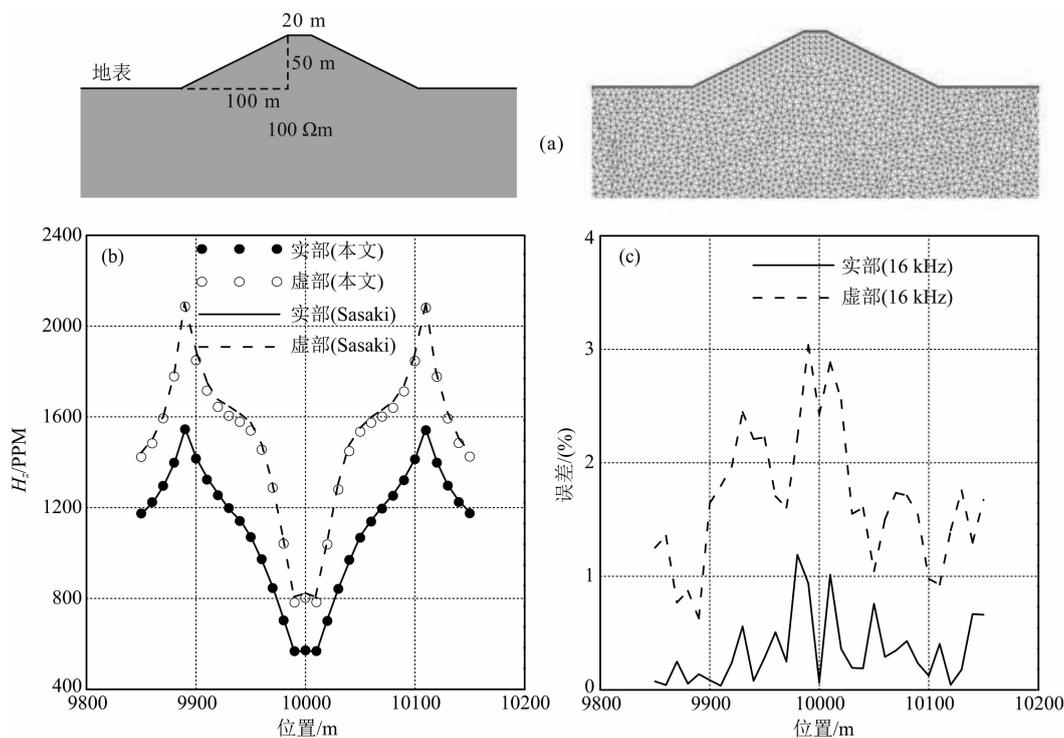


图 1 本文模拟结果与 Sasaki 和 Nakazato(2003)模拟结果对比图

(a) 山峰模型; (b) 模拟结果对比; (c) 相对误差.

Fig. 1 Comparison of FE results from this paper with those from Sasaki and Nakazato (2003)

(a) A trapezoid hill model; (b) Comparison of the FE solution of this paper with those from Sasaki and Nakazato (2003); (c) Relative errors.

## 4 地形影响特征分析

下面我们通过模拟山峰和山谷地形频率域和时间域航空电磁响应,分析地形对航空电磁响应的影响特征.山峰和山谷地形模型及其网格划分如图 3a 和 3b 所示(简称模型二和模型三).山峰高度和山谷深度均为 20 m,在顶部和底部的宽度分别为 60 m 和 220 m.模型的电阻率为  $100 \Omega\text{m}$ .对于频率域航空电磁系统,本文对水平共面和直立共轴两种装置计算了 380 Hz, 1600 Hz, 6300 Hz, 25 kHz, 120 kHz 五个频率的航空电磁响应.对于时间域航空电磁系

统,本文计算了垂直磁偶极源发射条件下磁场  $B_z$  和磁感应  $\text{dB}_z/\text{dt}$ .发射和接收机高度均为 30 m,收发距为 10 m.发射波形为阶跃波,我们在  $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{s}$  之间选取了 12 个时间道.图 3 给出频率域正演模拟结果,图 4 给出时间域正演模拟结果.

从上面的模拟结果和响应特征分析可以看出:

- (1)地形对频率域和时间域航空电磁响应均有较大影响,航空电磁数据处理解释不能忽略地形效应;
- (2)频率越高或时间道越早,电磁响应受地形的影响越大.这是因为高频段电磁信号穿透能力较弱,反映的信息主要来自距离航空电磁收发装置较近的地表介质;而低频段电磁信号穿透能力较强,反映的

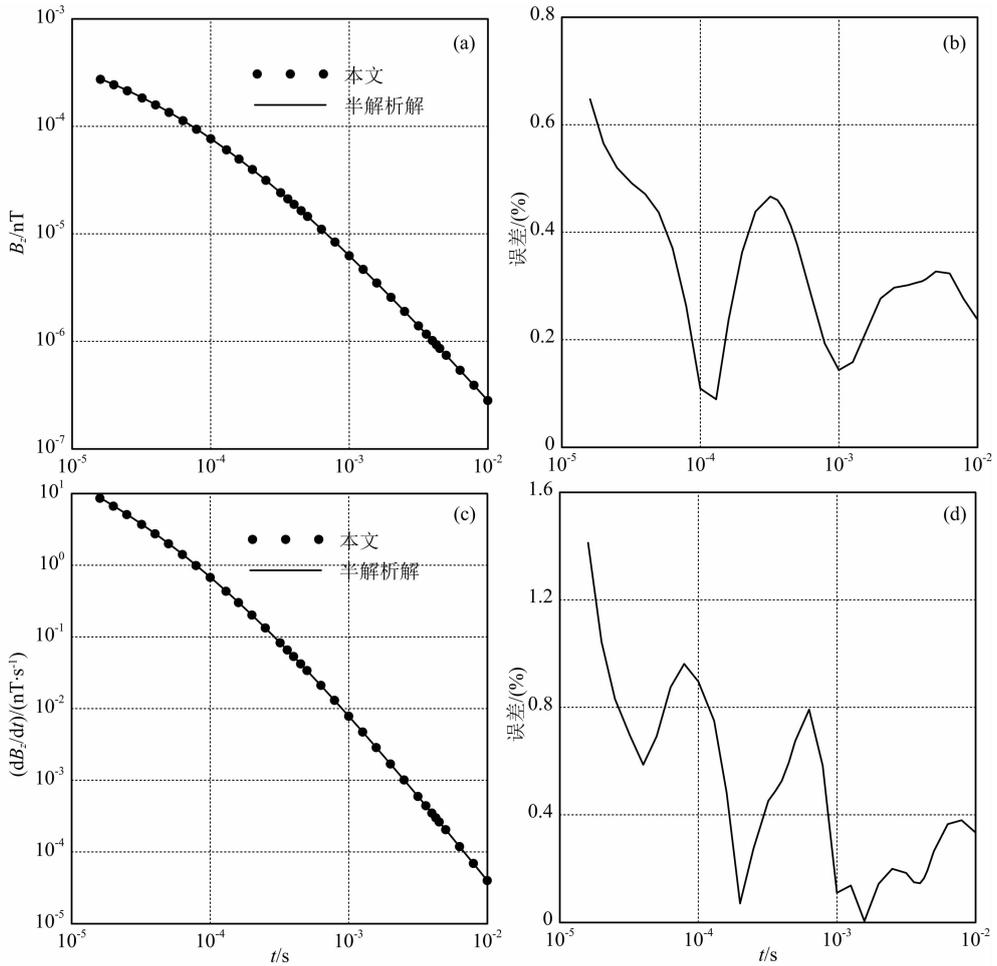


图2 本文模拟结果与半解析解对比图

(a)  $B_z$  场模拟结果对比; (b)  $B_z$  场相对误差曲线; (c)  $dB_z/dt$  模拟结果对比; (d)  $dB_z/dt$  相对误差曲线.

Fig. 2 Comparison of FE results from this paper with the semi-analytical ones by Yin et al. (2013)

(a) Comparison of time-domain  $B_z$ -field; (b) Relative errors for  $B_z$ -field; (c) Comparison of  $dB_z/dt$ ; (d) Relative errors for  $dB_z/dt$ .

信息主要来自距离航空电磁收发装置较远的深部地下介质. 由此可以理解地形主要对高频段电磁信号影响大. 与之相对应, 早期道电磁信号反映的信息来自距离航空电磁收发装置较近的地表介质, 而晚期道信号反映的信息主要来自离航空电磁收发装置较远的深部地下介质. 因此地形对早期时间道电磁信号影响更大;

(3)带地形航空电磁响应的曲线形态与地形之间存在镜像关系. 在地形的拐点位置, 电磁响应显示出剧烈的变化.

## 5 地形对异常体响应的影响

为分析地形对异常体响应的影响, 我们设计了山峰和山谷地形下埋藏低阻异常体的模型(简称模型四和模型五). 如图 5a 和 5b, 山峰和山谷模型参数与图 3 中的模型参数相同. 异常体埋在距地表

30 m 的位置, 大小  $40 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ , 电阻率为  $10 \text{ } \Omega\text{m}$ . 围岩电阻率为  $100 \text{ } \Omega\text{m}$ . 图 5 和 6 分别给出频率域和时间域正演模拟结果. 为便于分析, 我们同时给出了水平地表半空间中埋有相同异常体的模型响应.

图 7a 和 7b 分别给出了山峰和山谷地形下埋有两个异常体的模型(简称模型六和模型七). 山峰和山谷模型参数与图 3 中的模型参数相同. 两个异常体的大小均为  $40 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ . 左侧的异常体埋深较浅, 位于斜坡中点下方 20 m 处; 右侧的异常体埋深较深, 位于斜坡中点下方 30 m 处. 两个异常体的电阻率均为  $10 \text{ } \Omega\text{m}$ . 围岩电阻率为  $100 \text{ } \Omega\text{m}$ . 图 7 和 8 分别给出这两个模型的频率域和时间域正演模拟结果. 为便于分析, 我们同时给出了水平地表半空间中埋有相同异常体的模型响应.

对比频率域/时间域响应可以发现, 纯地形与带地形异常体的响应曲线在高频段和早期时间道差异较小; 然而, 随着频率的降低或时间的延长, 两者差

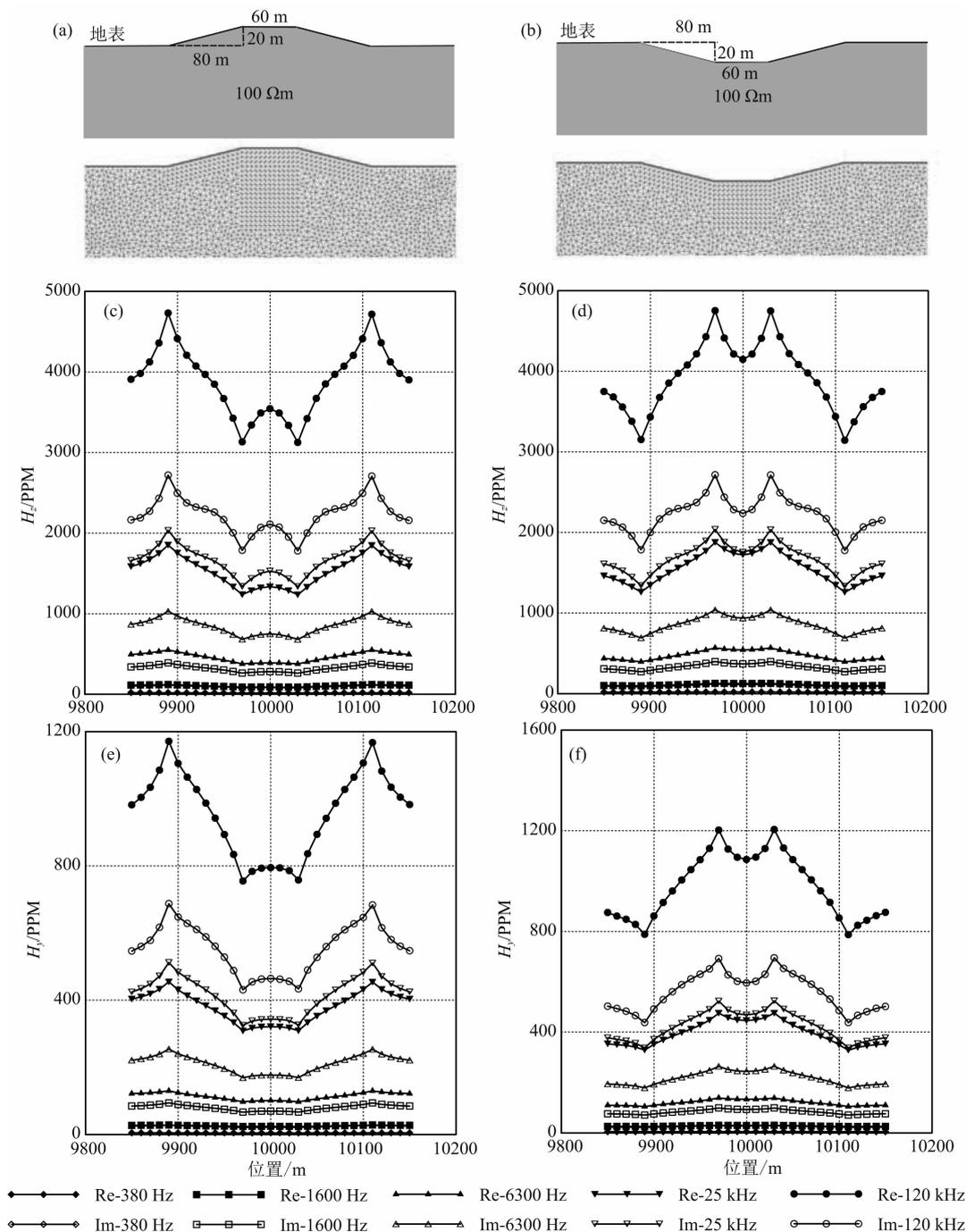


图3 频率域航空电磁正演模拟

(a)山峰模型; (b)山谷模型; (c)和(e)山峰模型的HCP和VCA航空电磁响应; (d)和(f)山谷模型的HCP和VCA航空电磁响应。

Fig. 3 Frequency-domain AEM responses for (a) a hill model and (b) a valley model. (c) and (e) present respectively the HCP and VCA coil responses for the hill model, while (d) and (f) present respectively the HCP and VCA coil responses for the valley model

异逐渐变大,地下电性不均匀体的响应突出表现出来。这从物理上很容易解释。事实上,在高频段和早期时间道,电磁信号穿透浅,主要反映地表信息,此时地形响应占主导地位,而异常体的响应微弱、难以识别;随着频率降低,或时间向晚期道推移,电磁信号逐步穿透地下介质,地表地形响应减弱,而异常体

的响应增强。由此,可以得出结论,地形效应主要体现在频域电磁信号的高频段或时域电磁信号的早期时间道,而有一定埋深的目标体的电磁响应主要体现在中低频和中晚期时间道(取决于良导体导电性和埋深)。由此,通过分析不同频段或不同时间道电磁信号,我们可有效识别地形效应和异常体响应。

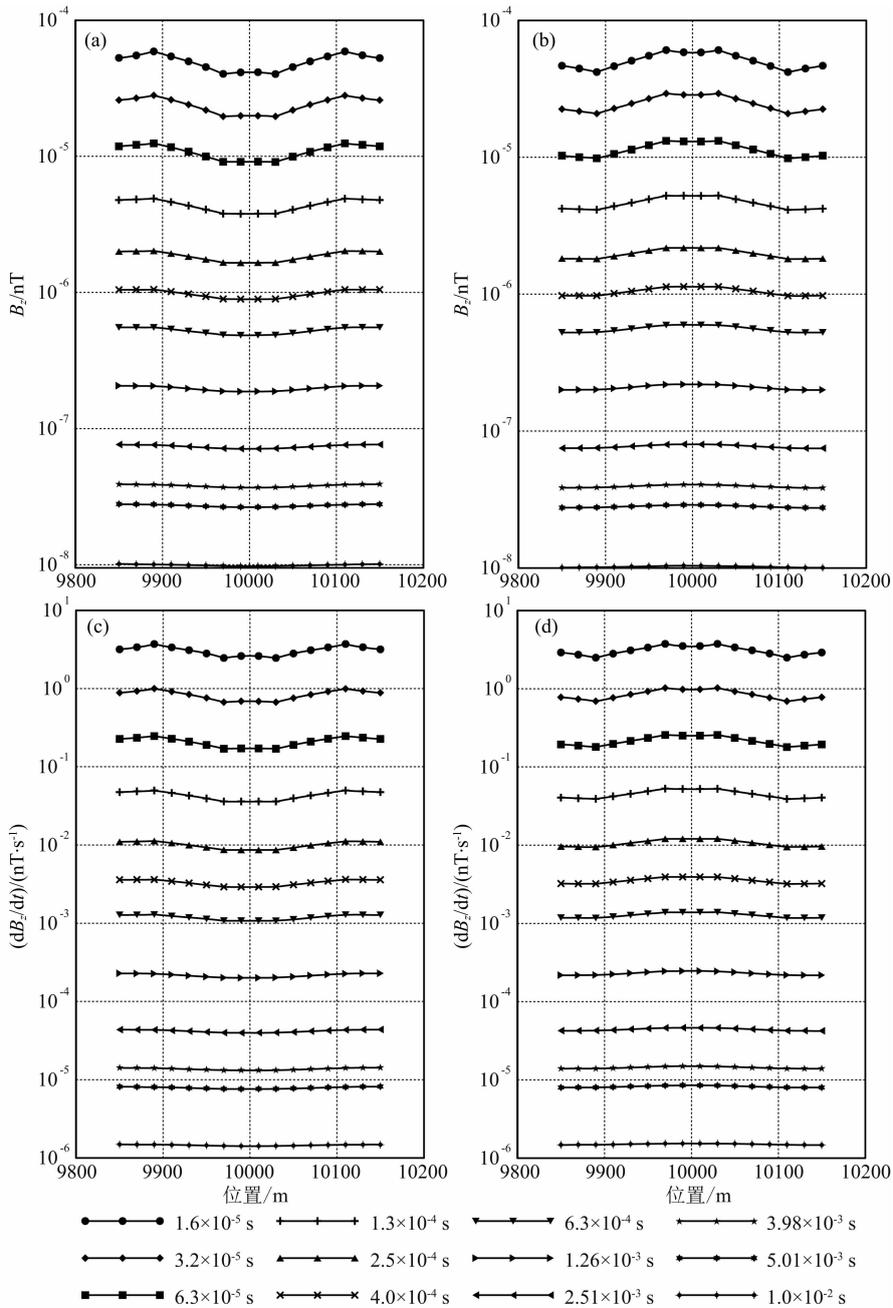


图 4 时间域航空电磁正演模拟结果

(a) 山峰地形  $B_z$  响应; (b) 山谷地形  $B_z$  响应; (c) 山峰地形  $dB_z/dt$  响应; (d) 山谷地形  $dB_z/dt$  响应。

Fig. 4 (a) Time-domain  $B_z$ -field for the hill model shown in Fig. 3a; (b) Time-domain  $B_z$ -field for the valley model shown in Fig. 3b; (c)  $dB_z/dt$  for the hill model; and (d)  $dB_z/dt$  for the valley model

为了便于分析异常体响应相对整个模型响应的大小,了解地形对航空电磁响应的影响程度,进而确定地形响应和异常体响应之间的量化关系,我们对异常体响应和纯地形影响进行计算,并和整个模型响应进行对比。针对模型四至七,图 9 给出了频率域异常体响应相对于不含异常体模型响应的比值曲线;图 10 给出了频率域纯地形响应相对于不含地形响应的比值曲线;图 11 给出了时间域异常体响应相

对于不含异常体模型响应的比值曲线;图 12 给出了时间域纯地形响应相对于不含地形响应的比值曲线。

从图 5,7,9 和 10 给出的频率域正演模拟结果、地形相对影响曲线和异常体相对响应曲线,可以看出:在 380 Hz、1600 Hz 等低频信号中,异常体相对响应较大;而在 25 kHz、120 kHz 等高频信号中异常体相对响应较小;地形的相对影响与异常体响应

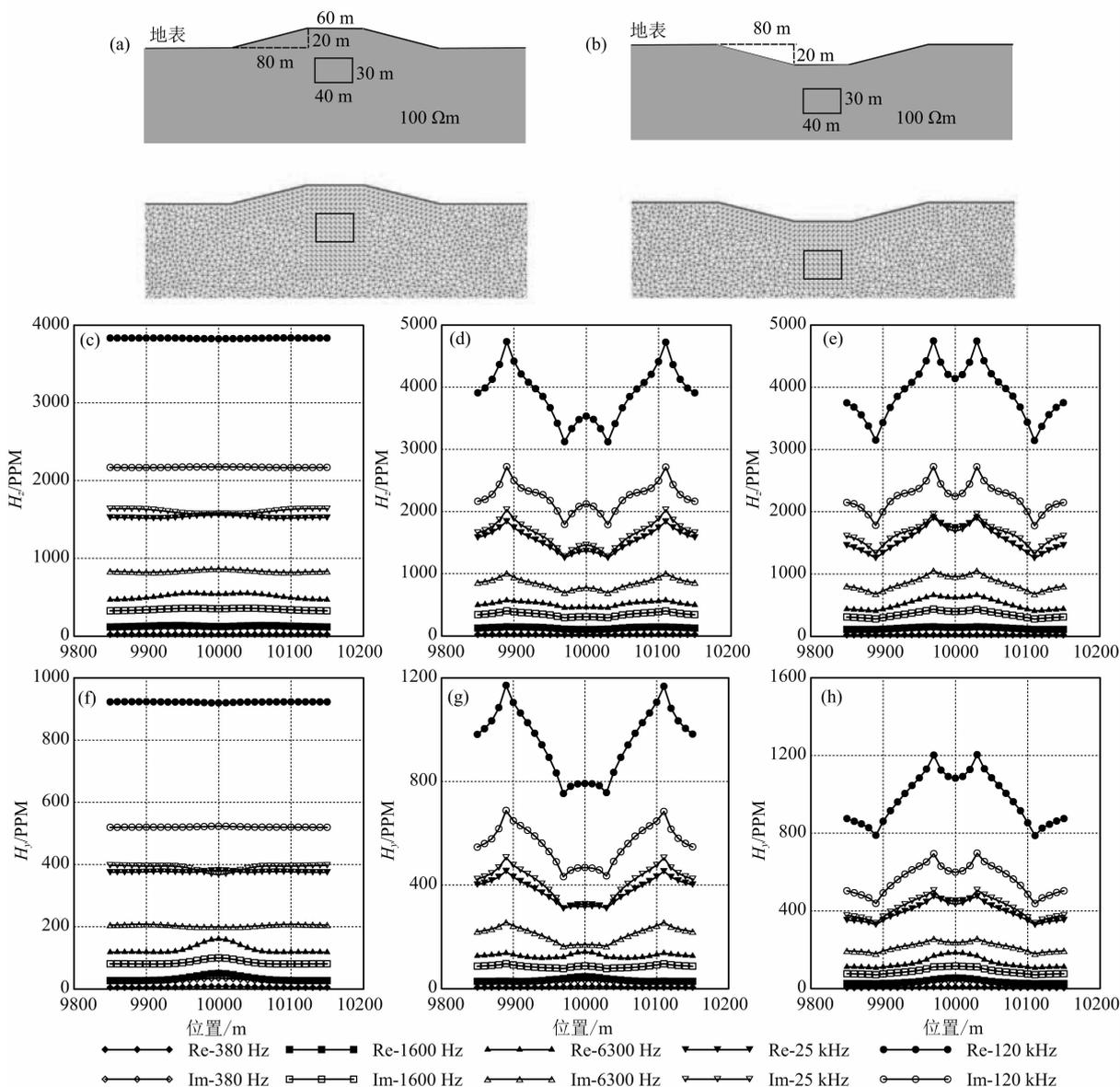


图5 频率域航空电磁响应

(a) 山峰下埋有异常体模型;(b)山谷下埋有异常体模型;(c)水平地表半空间下埋有异常体模型的 HCP 电磁响应;(d)山峰下埋有异常体模型的 HCP 电磁响应;(e)山谷下埋有异常体模型的 HCP 电磁响应;(f)水平地表半空间下埋有异常体模型的 VCA 电磁响应;(g)山峰下埋有异常体模型的 VCA 电磁响应;(h)山谷下埋有异常体模型的 VCA 电磁响应。

Fig. 5 Frequency-domain AEM responses

(a) A hill model with an abnormal body embedded; (b) A valley model with an abnormal body embedded; (c) Frequency-domain EM responses of an HCP coil system for a flat half-space model with an abnormal body embedded; (d) EM responses of an HCP coil system for a hill half-space with an abnormal body embedded; (e) EM responses of an HCP coil system for a valley half-space with an abnormal body embedded; (f) EM responses of a VCA coil system for a flat half-space model with an abnormal body embedded; (g) EM responses of a VCA coil system for a hill half-space with an abnormal body embedded; (h) EM responses of a VCA coil system for a valley half-space with an abnormal body embedded

相反,在 25 kHz、120 kHz 等高频信号,地形相对影响较大;而在 380 Hz、1600 Hz 等低频信号地形相对影响较小.这是因为地表地形距离航空电磁收发装置更近,高频段电磁信号穿透能力较弱,主要反映地形影响;随着频率降低,低频段电磁场穿透深度增

大,有一定埋深的异常体响应得到明显反映。

从图 6, 8, 11 和 12 给出的时间域正演模拟结果、地形相对影响曲线和异常体相对响应曲线,可以看出:(1)异常体在第三和第四时间道得到较好反应.这是由于更早时间道电磁信号尚未传播到异常

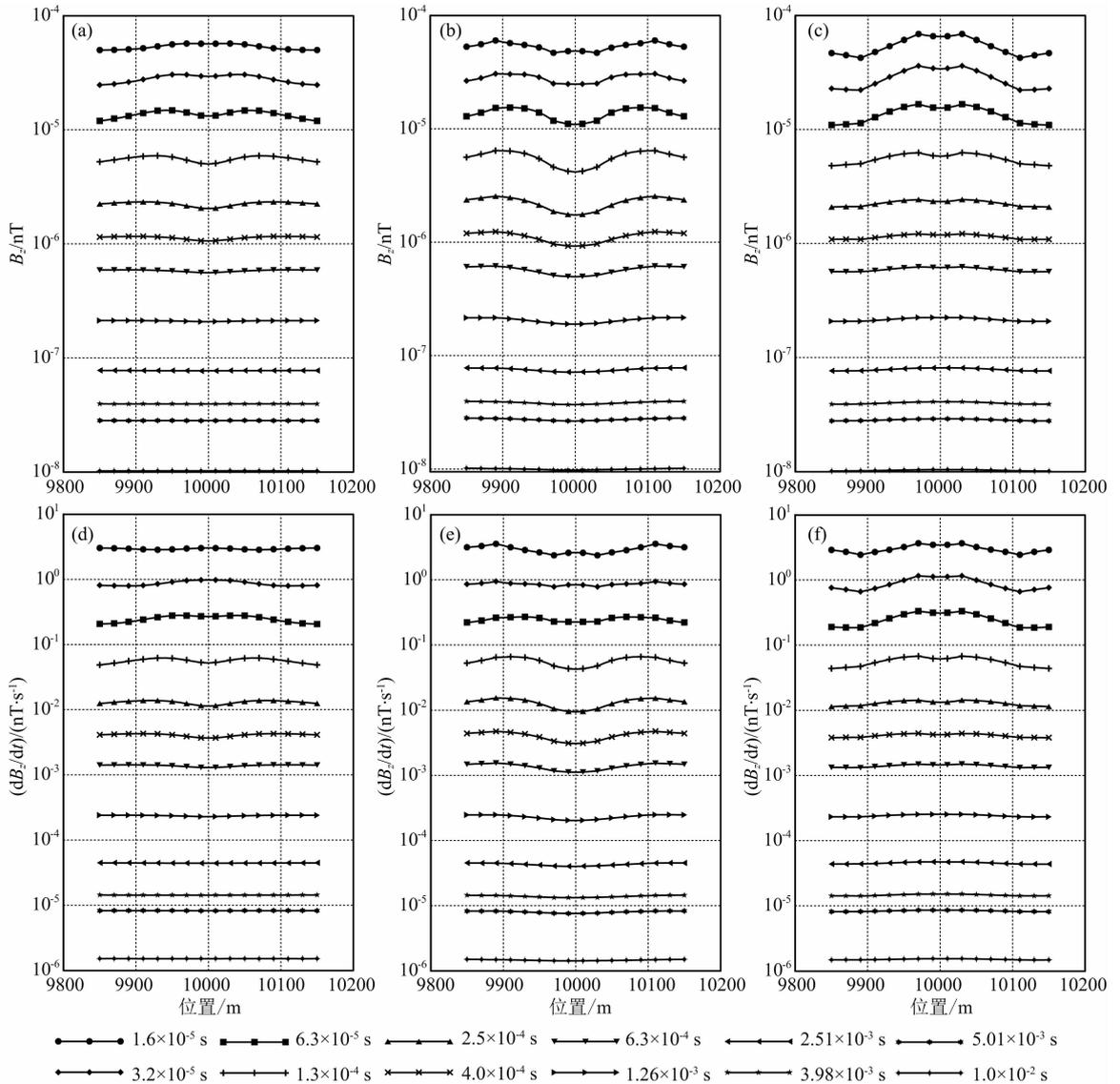


图6 (a)水平地表半空间下埋有异常体的时间域磁场响应  $B_z$ ; (b)山峰下埋有异常体的时间域磁场响应  $B_z$ ; (c)山谷下埋有异常体的时间域磁场响应  $B_z$ ; (d)水平地表半空间下埋有异常体的时间域  $dB_z/dt$  响应; (e)山峰下埋有异常体的时间域  $dB_z/dt$  响应; (f)山谷下埋有异常体的时间域  $dB_z/dt$  响应

Fig. 6 (a) Time-domain  $B_z$ -field for a flat half space model with an abnormal body embedded; (b)  $B_z$ -field for a hill half-space with an abnormal body embedded; (c)  $B_z$ -field for a valley half-space with an abnormal body embedded; (d) Time-domain  $dB_z/dt$  for a flat half space model with an abnormal body embedded; (e)  $dB_z/dt$  for a hill half-space with an abnormal body embedded; (f)  $dB_z/dt$  for a valley half-space with an abnormal body embedded

体,而更晚期时间道则已穿透异常体。(2)地形在早期时间道得到良好的反映,随时间延迟的增加地形影响减小。这是由于早期信号(对应于高频段)反映距离航空电磁收发装置较近的地表介质-地形信息;随着时间的延迟,电磁信号反映离航空电磁收发装置较远的地下介质信息,地形影响减弱。

比较异常体的相对响应和地形的相对影响可以进一步发现:地形对电磁信号的影响与异常体的响应在相同数量级上,因此,地形对航空电磁信号的影响是不可忽视。

## 6 结论

本文利用非结构有限元法很好地模拟了带地形模型的航空电磁系统响应。通过与均匀半空间的半解析解及已发表模型结果的对比,验证了本文算法具有较高的计算精度。

本文计算结果表明,地形对航空电磁响应影响很大,在地形复杂地区从事航空电磁观测,地形效应不容忽视,尤其是在频率域系统的高频段或时间域

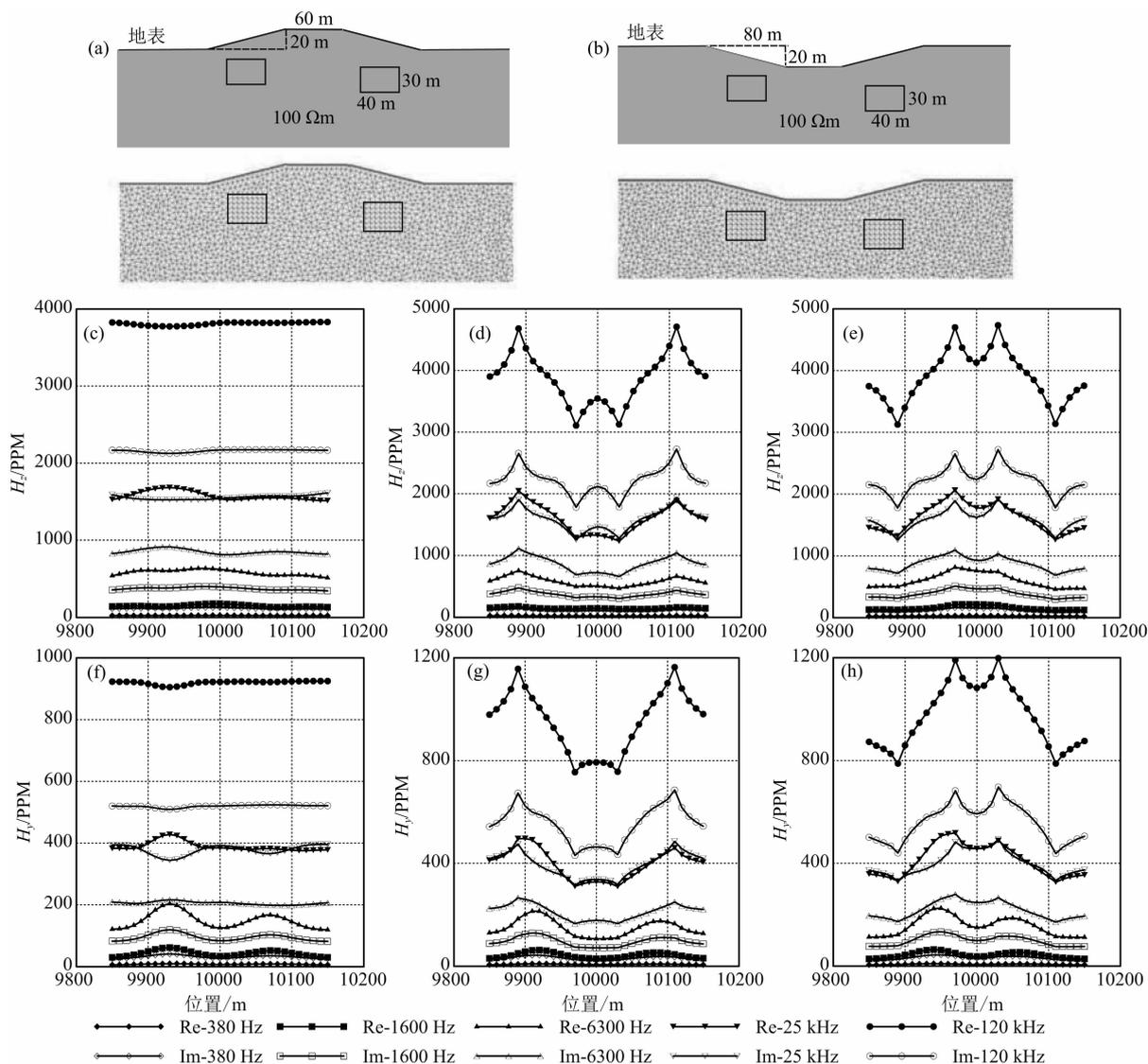


图7 频率域航空电磁响应

(a)山峰下埋有两个异常体模型;(b)山谷下埋有两个异常体模型;(c)水平地表半空间下埋有两个异常体模型的 HCP 电磁响应;(d)山峰下埋有两个异常体模型的 HCP 电磁响应;(e)山谷下埋有两个异常体模型的 HCP 电磁响应;(f)水平地表半空间下埋有两个异常体模型的 VCA 电磁响应;(g)山峰下埋有两个异常体模型的 VCA 电磁响应;(h)山谷下埋有两个异常体模型的 VCA 电磁响应。

Fig. 7 Frequency-domain AEM responses

(a) A hill model with two abnormal bodies embedded; (b) A valley model with two abnormal bodies embedded; (c) EM responses of an HCP coil system for a flat half-space model with two abnormal bodies embedded; (d) EM responses of an HCP coil system for a hill half-space with two abnormal bodies embedded; (e) EM responses of an HCP coil system for a valley half-space with two abnormal bodies embedded; (f) EM responses of a VCA coil system for a flat half-space model with two abnormal bodies embedded; (g) EM responses of a VCA coil system for a hill half-space with two abnormal bodies embedded; (h) EM responses of a VCA coil system for a valley half-space with two abnormal bodies embedded

系统的早期时间道。对山脊和山谷地形正演模拟结果表明,在地形变化的突变点位置,电磁响应出现快速的变化。在这些地形突变区进行航空电磁数据解释时,应对地形影响给予高度重视。比较频率域和时间域系统的正演结果,可以进一步发现地形对频率域航空电磁响应主要发生在高频段,而对时间域航空电磁系统的影响主要发生在早期时间道。相比之

下,具有一定埋深的地下良导体在高频段响应反应较弱,主要出现在中低频和中晚期时间道(取决于良导体导电性和埋深)。这在一定程度上为我们有效识别地形效应和异常体响应提供可能。然而,由于地形响应和异常体响应处于相同数量级,为有效实现航空电磁数据反演解释,对地形影响进行模拟和校正十分必要。

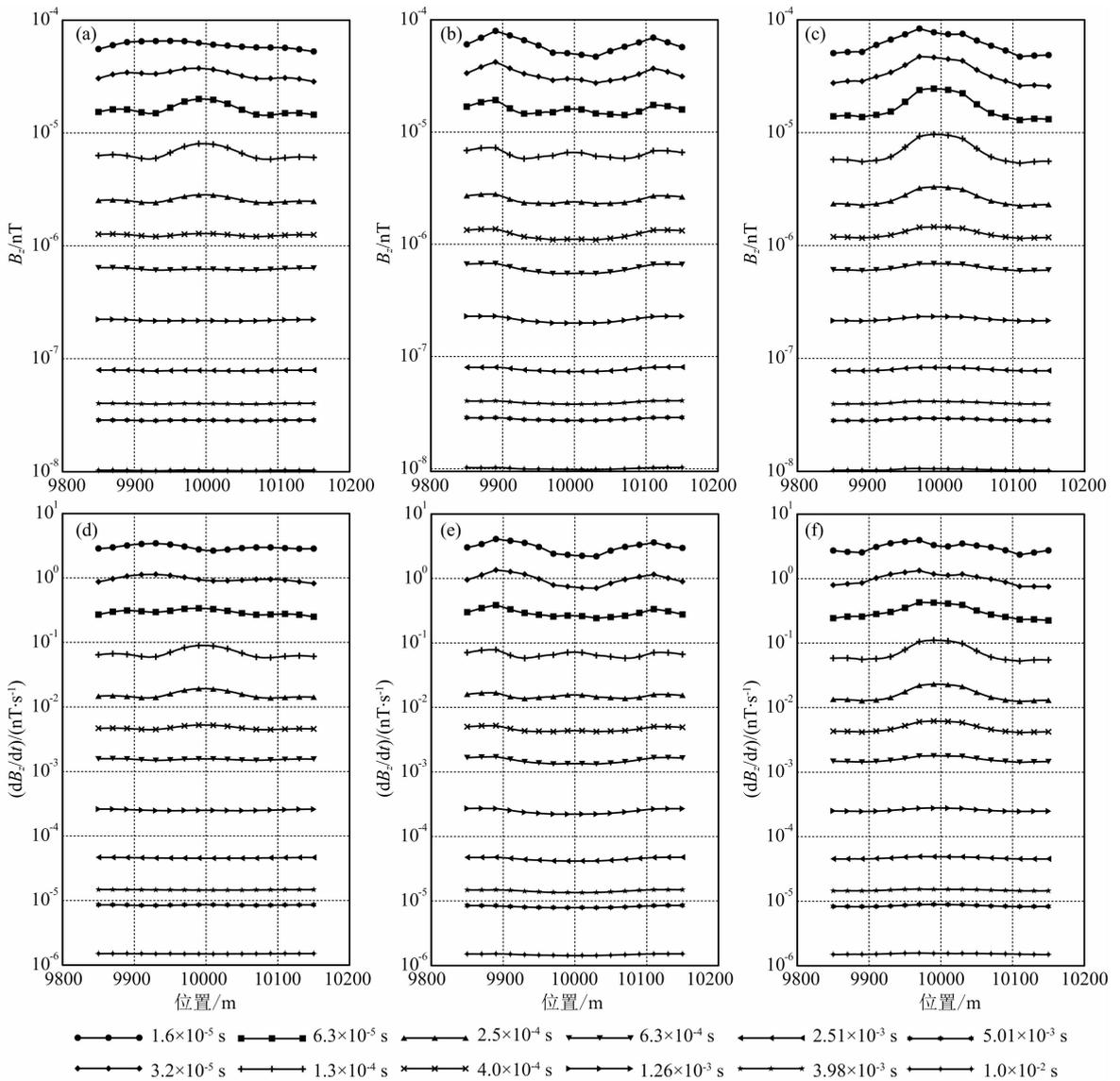


图 8 时间域航空电磁响应

(a) 水平地表半空间下埋有两个异常体模型的磁场响应  $B_z$ ; (b) 山峰下埋有两个异常体的磁场响应  $B_z$ ; (c) 山谷下埋有两个异常体的磁场响应  $B_z$ ; (d) 水平地表半空间下埋有两个异常体的  $dB_z/dt$  响应; (e) 山峰下埋有两个异常体的  $dB_z/dt$  响应; (f) 山谷下埋有两个异常体的  $dB_z/dt$  响应。

Fig. 8 Time-domain AEM responses

(a)  $B_z$ -field for a flat half-space model with two abnormal bodies embedded; (b)  $B_z$ -field for a hill half-space with two abnormal bodies embedded; (c)  $B_z$ -field for a valley half-space with two abnormal bodies embedded; (d)  $dB_z/dt$  for a flat half space model with two abnormal bodies embedded; (e)  $dB_z/dt$  for a hill half-space with two abnormal bodies embedded; (f)  $dB_z/dt$  for a valley half-space with two abnormal bodies embedded

**致谢** 我们向贲放、黄威、齐彦福、任秀艳、黄鑫和邱长凯在模型计算和论文准备过程中给予的帮助表示感谢。特别对审稿人提出宝贵的修改意见表示感谢，最后感谢编辑们的辛苦工作。

## References

Annetts D, Sugeng F, Raiche A. 1998. The effect of topography on

airborne electromagnetic response. *SEG Expanded Abstracts*. Avdeev D B, Kuvshinov A V, Pankratov O V, et al. 1998. Three-dimensional frequency-domain modeling of airborne electromagnetic responses. *Exploration Geophysics*, 29(2): 111-119.

Baba K, Seama N. 2002. A new technique for the incorporation of seafloor topography in electromagnetic modelling. *Geophysical Journal International*, 150(2): 392-402.

Cai J, Qi Y F, Yin C C. 2014. Weighted Laterally-constrained inversion of frequency-domain airborne EM data. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(3): 953-960, doi:

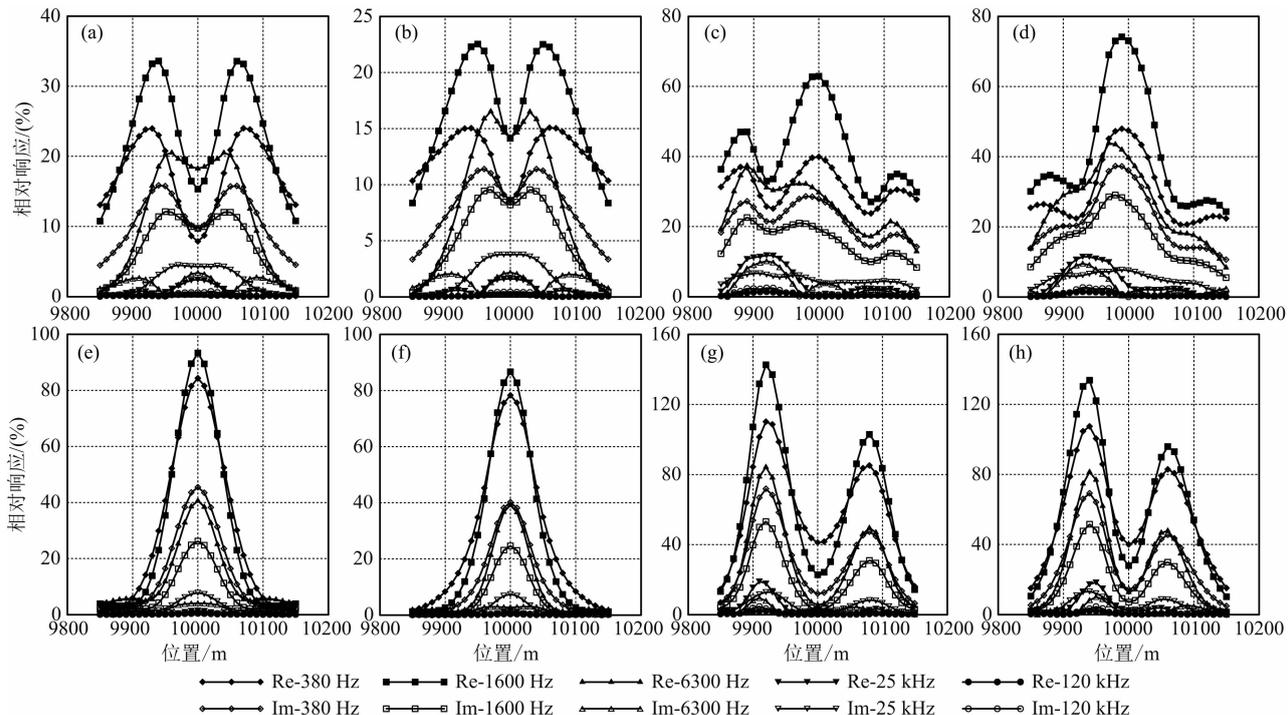


图9 异常体和不含异常体频率域航空电磁响应对比  
(带地形和异常体的响应与不带地形不带异常体响应的差与带地形不带异常体响应的比值)  
(a)~(d)模型四至七的HCP异常体响应比值;(e)~(h)模型四至七的VCA异常体响应比值。  
Fig. 9 Frequency-domain AEM responses of abnormal bodies embedded in a topographic half-space compared to topographic background signal  
(a)~(d) HCP coil responses for model 4~7; (e)~(h) VCA coil responses for model 4~7.

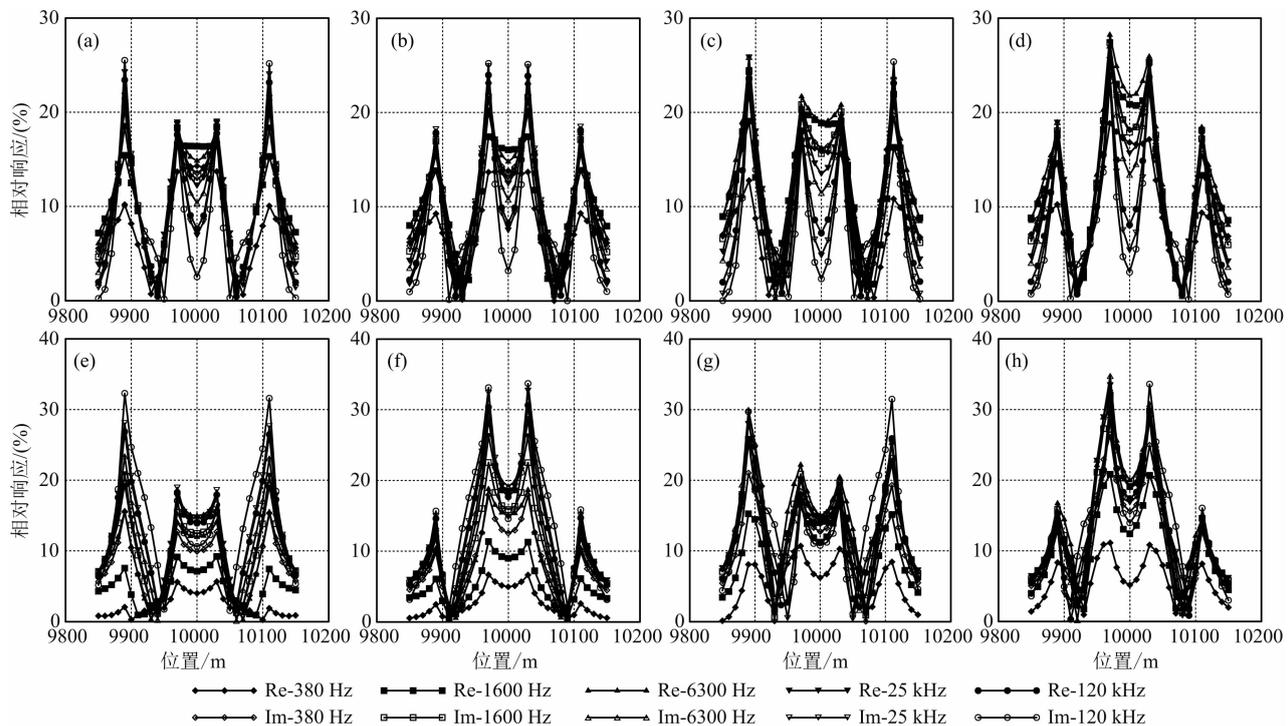


图10 地形和不含地形频率域航空电磁响应对比  
(带地形和异常体的响应与不带地形带异常体响应的差与不带地形带异常体响应的比值)  
(a)~(d)模型四至七的HCP电磁响应比值;(e)~(h)模型四至七的VCA电磁响应比值。  
Fig. 10 Frequency-domain AEM responses of topographic half-space compared to background signal (ratio of difference between AEM responses with topography and abnormal bodies and those with abnormal bodies but without topography to the later response)  
(a)~(d) HCP coil responses for model 4~7; (e)~(h) VCA coil responses for model 4~7.

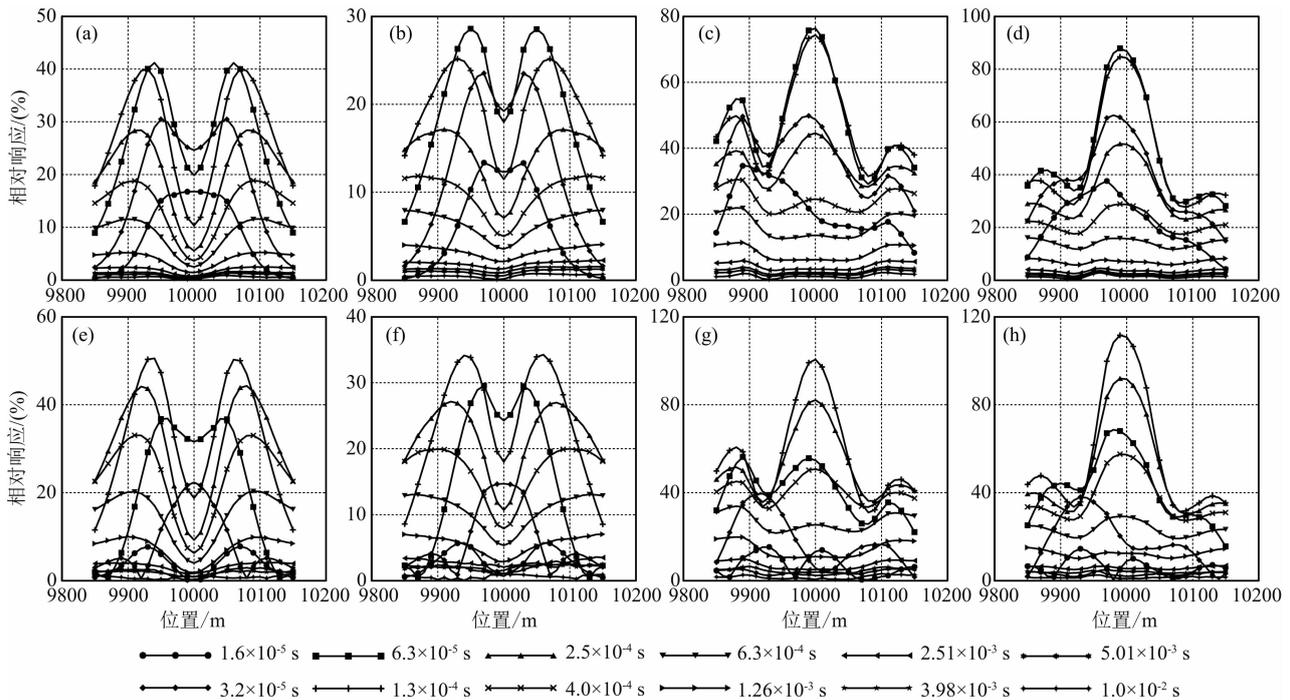


图 11 异常体和不含异常体时间域航空电磁响应对比  
(带地形和异常体的响应与带地形不带异常体响应的差与带地形不带异常体响应的比值)  
(a)—(d)模型四至七的异常体  $B_z$  响应比值;(e)—(h)模型四至七的异常体  $dB_z/dt$  响应比值。

Fig. 11 Time-domain AEM responses of abnormal bodies embedded in a topographic half-space compared to background topographic signal  
(a)–(d)  $B_z$  for model 4–7; (e)–(h)  $dB_z/dt$  for model 4–7.

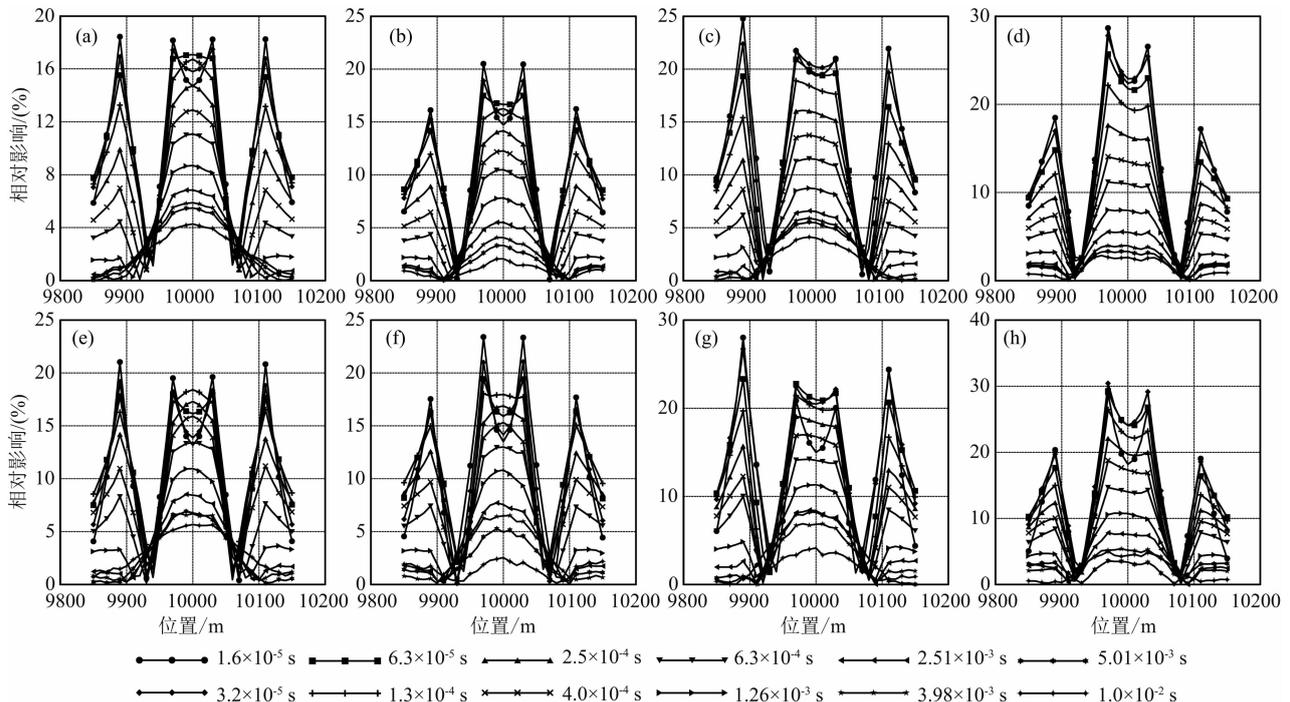


图 12 地形和不含地形时间域航空电磁响应对比  
(带地形和异常体的响应与不带地形带异常体响应的差与不带地形带异常体响应的比值)  
(a)–(d)模型四至七的地形  $B_z$  响应比值;(e)–(h)模型四至七的地形  $dB_z/dt$  响应比值。

Fig. 12 Time-domain AEM responses of topographic half-space compared to background signal  
(a)–(d) Ratio of  $B_z$  responses to background signal for model 4–7; (e)–(h) Ratio of  $dB_z/dt$  responses to background signal for model 4–7.

- 10.6038/cjg20140324.
- Di Q Y, Unsworth M, Wang M Y. 2004. 2.5-D CSAMT modeling with the finite element method over 2-D complex earth media. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 47(4): 723-730.
- Fan C. 2013. Research on complex resistivity forward and inversion with finite element method and its application [Ph. D. thesis] (in Chinese). Jilin: College of Geo-exploration Sciences and Technology of Jilin University.
- Fan C, Li T L, Wang D Y, et al. 2014. Research on 2.5D SIP inversion with topography. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 88(4): 755-762.
- Jin J M. 1998. Electromagnetic Finite-Element Method (in Chinese). Xi'an: Xidian University Press.
- Liu G M, Becker A. 1992. Evaluation of terrain effects in AEM surveys using the boundary element method. *Geophysics*, 57(2): 272-278.
- Liu Y H, Yin C C. 2013. 3D inversion for frequency-domain HEM data. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(12): 4278-4287, doi: 10.6038/cjg20131230.
- Mitsuhata Y. 2000. 2-D electromagnetic modeling by finite-element method with a dipole source and topography. *Geophysics*, 65(2): 465-475.
- Nam M J, Kim H J, Song Y, et al. 2007. 3D magnetotelluric modelling including surface topography. *Geophysical Prospecting*, 55(2): 277-287.
- Newman G A, Alumbaugh D L. 1995. Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences. *Geophysical Prospecting*, 43(8): 1021-1042.
- Sasaki Y, Nakazato H. 2003. Topographic effects in frequency-domain helicopter-borne electromagnetics. *Exploration Geophysics*, 34(2): 24-28.
- Siemon B, Auken E, Christiansen A V. 2009. Laterally constrained inversion of helicopter-borne frequency-domain electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 67(3): 259-268.
- Vallee M A, Smith R S. 2009. Inversion of airborne time-domain electromagnetic data to a 1D structure using lateral constraints. *Near Surface Geophysics*, 7: 63-71.
- Xu S Z. 1988. Selection of wave number K in Fourier inverse transformation for point source and 2-D electric field problem. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 10(3): 235-239.
- Xu S Z. 1994. The Finite-element Method in Geophysics (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Yin C C, Hodges G. 2007. Simulated annealing for airborne EM inversion. *Geophysics*, 72(4): F189-F195.
- Yin C, Smith R S, Hodges G, et al. 2008. Modeling results of on- and off-time B and dB/dt for time-domain airborne EM systems. Extended Abstract, 70th Annual EAGE Conference and Exhibition, Rome, 1-4.
- Yin C C, Huang W, Ben F. 2013. The full-time electromagnetic modeling for time-domain electromagnetic systems. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(9): 3153-3162, doi: 10.6038/cjg20130928.
- Zhang J F, Zhi Q Q, Li X, et al. 2013. 2.5D finite element numerical simulation for electric dipole source on ridge terrain. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (in Chinese), 23(9): 2540-2550.

#### 附中文参考文献

- 蔡晶, 齐彦福, 殷长春. 2014. 频率域航空电磁数据的加权横向约束反演. *地球物理学报*, 57(3): 953-960, doi: 10.6038/cjg20140324.
- 底青云, Unsworth M, 王妙月. 2004. 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. *地球物理学报*, 47(4): 723-730.
- 范翠松. 2013. 基于有限元法的复电阻率正反演研究及应用[博士学位论文]. 长春: 吉林大学地球探测科学与技术学院, 69-99.
- 范翠松, 李桐林, 王大勇等. 2014. 起伏地形下复电阻率法 2.5 维反演研究. *地质学报*, 88(4): 755-762.
- 金建铭. 1998. 电磁场有限元方法. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- 刘云鹤, 殷长春. 2013. 三维频率域航空电磁反演研究. *地球物理学报*, 56(12): 4278-4287, doi: 10.6038/cjg20131230.
- 徐世浙. 1988. 点电源二维电场问题中付氏反变换的波数  $k$  的选择. *物探化探计算技术*, 10(3): 235-239.
- 徐世浙. 1994. 地球物理中的有限单元法. 北京: 科学出版社.
- 殷长春, 黄威, 贲放. 2013. 时间域航空电磁系统瞬变全时响应正演模拟. *地球物理学报*, 56(9): 3153-3162, doi: 10.6038/cjg20130928.
- 张继锋, 智庆全, 李貅等. 2013. 起伏地形电偶源 2.5 维有限元数值模拟. *中国有色金属学报*, 23(9): 2540-2550.

(本文编辑 何燕)