



航空频率域电磁法中姿态旋转 不变量的姿态校正算法

李 光^{1,2}, 渠晓东^{1,2}, 黄 玲^{1,3}, 方广有^{1,3}

(1. 中国科学院 电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100190)

摘 要: 基于磁偶极子的航空频率域电磁法仪器在飞行探测的过程中, 由于吊舱姿态角的变化, 使得收发线圈与大地之间的耦合发生变化, 从而产生姿态误差。根据误差来源的不同, 可以将姿态误差分为方向误差与位置误差两种。为了消除姿态误差的影响, 基于层状大地模型, 首先推导得到三轴发射、三轴接收线圈架构下的电磁张量姿态旋转不变量, 再基于重叠偶极子模型, 推导得到吊舱翻滚角及俯仰角的余弦值, 进而实现不变量位置误差的校正。与传统的姿态校正算法相比, 不变量的姿态误差校正算法无需测量吊舱的姿态角信息。由仿真结果可知, 不变量的姿态校正算法可以实现传统姿态校正算法在 3 种常用线圈架构中的校正效果; 在常见的 H 型与 K 型三层大地模型下, 校正后不变量的相对误差小于 0.1%, 从而验证了不变量姿态校正算法的可行性。

关键词: 航空频率域电磁法; 姿态误差; 电磁张量; 姿态旋转不变量; 重叠偶极子模型

文章编号: 1004-0609(2017)-03-0582-12

中图分类号: P319.1

文献标志码: A

频率域电磁法属于地球物理电磁勘探方法的一种, 相较于时间域电磁法, 具有不受关断时间影响、信噪比高等优点, 在浅地表探测方面具有较强的优势, 目前已被广泛应用于地质普查、金属勘探、考古、城市地下管道探测等领域。而基于磁偶极子的频率电磁法的基本工作原理为: 发射线圈以步进或合成方式发射特定频率的磁场信号(即一次场), 与待测大地或良导异常体作用产生感应涡流, 进而产生相同频率的磁场信号(即二次场), 再通过分析接收线圈接收到的二次场信号, 可实现对大地电阻率或地下异常体的探测^[1]。按照测深原理的不同, 频率域电磁法勘探可以分为几何测深(Geometrical sounding)与频率测深(Frequency sounding)两种^[2]。而航空频率域电磁法仪器常采用频率测深的方式, 相对于地面的频率域电磁法仪器, 其具有快速、高效、大面积探测等优势。目前已商业化的航空频率域电磁法仪器有加拿大 Fugro 公司的 DIGHEM 系统^[3-4]、RESOLVE 系统^[5]以及美国 Geophex 公司的 GEM-2A 系统^[6]等。

基于磁偶极子的航空频率域电磁法仪器的收发线圈之间采用刚性连接, 并集成放置于吊舱之中^[3, 5-6]。在测线飞行的过程中, 由于飞行速度、飞机颠簸、风

速、风向等因素的影响, 使得收发线圈与待测大地之间的耦合发生变化从而产生姿态误差。目前对航空频率域电磁法仪器中吊舱运动机理以及姿态变化对电磁响应影响的相关研究工作已经取得了一些成果: SON^[7]和 WON 等^[8]在进行水深探测试验时提出吊舱姿态角的变化会对航空电磁测量数据产生影响; DESZCZ-PAN 等^[9]和 FRASER^[10]对吊舱的晃动在航空电磁测量数据反演结果中产生的误差进行了研究; HOLLADAY 等^[11]研究了吊舱的姿态变化对高度测量以及海冰厚度探测产生的影响; 2006 年, DAVIS 等^[12-13]提出了吊舱沿着吊绳与飞机连接点的晃动模型, 将吊舱的运动分为纵向(In-line)运动以及横向(Cross-line)运动, 并分别研究了两种运动的特性以及高度变化对电磁响应的影响, 又于 2009 年提出了基于至少两个 GPS 天线的吊舱运动预测模型。依据姿态误差来源的不同, 本研究将姿态误差分为由收发线圈轴向变化引起的方向误差以及收发线圈位置变化引起的位置误差。YIN 与 FRASER^[14]于 2004 年首先提出了基于重叠偶极子模型的姿态校正算法, 通过推导出的垂直共轴(Vertical coaxial, 即 VCA)、垂直共面(Vertical coplanar, 即 VCP)以及水平共面(Horizontal coplanar, 即

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2012-1-03-05)

收稿日期: 2016-12-19; 修订日期: 2016-04-30

通信作者: 李 光, 博士研究生; 电话: 18811782541; E-mail: liguang706@163.com

HCP)3 种常用线圈架构发生姿态角旋转时的电磁响应系数,再利用测得的姿态角信息实现姿态误差的校正,但该算法仅校正了方向误差,并未对位置误差进行校正;2014 年曲昕馨等^[15]同样基于重叠偶极子模型,分别分析了方向误差及位置误差的影响,推导得到总姿态变化电磁响应比与方向和位置单独变化时电磁响应比的乘积近似成固定比例关系的结论,再通过测得的姿态角信息实现对姿态误差的校正。而对于时间域电磁系统的姿态误差校正,2010 年嵇艳菊等^[16]同样采用重叠偶极子模型对基于直升机的航空时间域电磁法中心回线线圈由于姿态角变化产生的方向误差进行了校正;2013 年王琦等^[17]定量地分析了在姿态角发生变化的情况下,固定翼时间域航空电磁响应系数,其中也同样包含方向误差及位置误差,并给出了基于电磁响应系数的系统姿态误差的校正方法,经过校正可以有效地提高反演精度;由于航空时间域电磁系统的姿态校正不是本工作的研究重点,这里不再详细描述。

由于 3 种常用线圈架构收发线圈发生姿态角旋转时的电磁响应系数中包含有吊舱的姿态角信息,传统的姿态误差校正算法均需要测量吊舱的姿态角信息。与需要测量系统姿态角信息不同,已有的磁梯度张量姿态旋转不变量在其推导的过程中采用姿态角旋转矩阵的特性,通过求得磁梯度张量矩阵的本征方程,实现了对系统姿态角信息的消除^[18],可知磁梯度张量姿态旋转不变量具有不受姿态误差影响的特性^[19-21],从而不再需要测量任何的姿态角信息,同时也具有其他优势,如能够很好地勾勒出场源边界、较磁总场更好地区分场源以及能够反映场源体的磁化倾角和偏角等^[18,22-23]。另外,大地电磁测深法(MT)的资料解释中也引入了大地电磁阻抗张量旋转不变量,其中 7 个是独立的^[24-25],而通过旋转不变量的引入,可以大大减小由于随着构造复杂性的增加而需要解释的参数、能够部分压制或平滑由于静态效应或地形起伏产生的噪声干扰、避免了测量方位的影响进而提高数据的解释精度^[24-27]。类似地,在层状大地模型下,本研究中首先正演出 9 种线圈架构(如图 1 所示)下的二次场格林函数张量矩阵,并与姿态角旋转矩阵作用,相应地推导得到三轴发射、三轴接收线圈架构下的电磁张量姿态旋转不变量(以下简称不变量),该不变量的幅度两倍于 HCP 线圈架构下的二次场且与收发线圈的轴向变化无关,即对方向误差不敏感。针对由收发距(收发线圈间的水平距离)及高度变化引起的位置误差,进一步提出基于重叠偶极子模型的不变量位置误差校正算法。该算法与传统的姿态校正算法不同,不变量的姿态误差校正算法不再需要测量吊舱的姿态角信息。

最后,将不变量姿态误差的校正效果与传统姿态校正算法在 3 种常用线圈架构中的校正效果进行比较,并在常见的 H 型及 K 型三层大地模型下,进一步验证该算法的可行性。

1 电磁张量正演模型

已知基于磁偶极子的航空频率域电磁法仪器的收发线圈分别取 x 、 y 、 z 轴向的情况下,可以得到 9 种的线圈架构^[28],如图 1 所示,其中处于对角线上的 3 种线圈架构较为常用,分别为 VCA、VCP 以及 HCP 的线圈架构。以 HCP 线圈架构测量层状的大地模型为例,如图 2 所示。以发射线圈中心沿 z 轴方向的垂线与大地的交点为坐标原点,收发线圈沿 x 轴向分布,

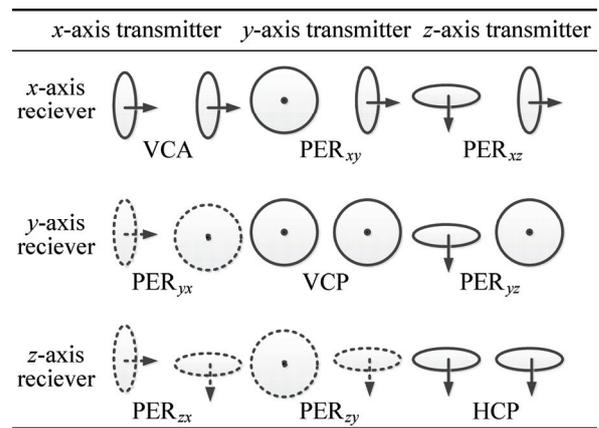


图 1 频率域电磁法仪器的 9 种线圈结构装置

Fig. 1 Nine configurations of frequency domain electromagnetic instruments

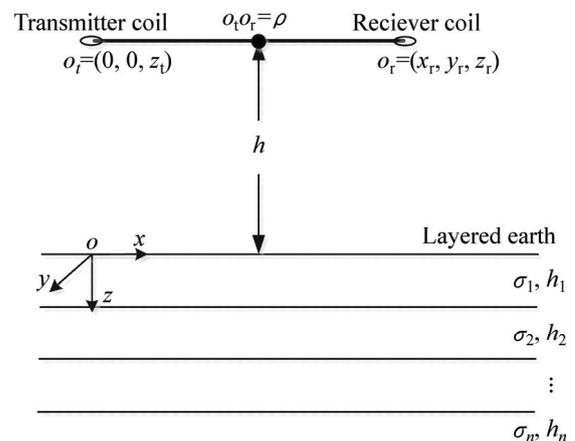


图 2 HCP 线圈架构测量层状大地模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of HCP configuration measuring layered earth

可知发射线圈的坐标为(0, 0, z_t), 接收线圈的坐标为(x_r, y_r, z_r)。

基于层状的大地模型, 可正演出9种线圈架构下二次场的格林函数张量矩阵 G^S ^[14, 29]:

$$G^S = \begin{bmatrix} G_{xx}^S & G_{xy}^S & G_{xz}^S \\ G_{yx}^S & G_{yy}^S & G_{yz}^S \\ G_{zx}^S & G_{zy}^S & G_{zz}^S \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$G_{xx}^S = \left(\frac{y_r^2}{\rho^3} - \frac{x_r^2}{\rho^3}\right)T_1 + \frac{x_r^2}{\rho^2}T_0, \quad G_{zz}^S = T_0,$$

$$G_{xy}^S = \frac{2x_r y_r}{\rho^3}T_1 - \frac{x_r y_r}{\rho^2}T_0, \quad G_{xz}^S = -\frac{x_r}{\rho}T_2,$$

$$G_{yy}^S = \left(\frac{x_r^2}{\rho^3} - \frac{y_r^2}{\rho^3}\right)T_1 + \frac{y_r^2}{\rho^2}T_0, \quad G_{yz}^S = -\frac{y_r}{\rho}T_2,$$

$$G_{yx}^S = -G_{xy}^S, G_{zx}^S = -G_{xz}^S, G_{zy}^S = -G_{yz}^S,$$

$$G_{xx}^S + G_{yy}^S + G_{zz}^S = 2G_{zz}^S \quad (2)$$

$$T_0 = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty r_{TE} e^{\lambda(z_r+z_t)} \lambda^2 J_0(\lambda\rho) d\lambda,$$

$$T_1 = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty r_{TE} e^{\lambda(z_r+z_t)} \lambda J_1(\lambda\rho) d\lambda,$$

$$T_2 = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty r_{TE} e^{\lambda(z_r+z_t)} \lambda^2 J_1(\lambda\rho) d\lambda \quad (3)$$

式中: G_{ab}^S 分别对应于9种线圈架构下二次场的格林函数, 表示 b 轴向的发射, a 轴向的接收, $a, b \in \{x, y, z\}$; $\rho = \sqrt{x_r^2 + y_r^2}$ 为收发距; $J_i(\lambda\rho)$ 分别为第一类 i 阶贝塞尔函数, $i \in \{0, 1\}$;

$$r_{TE} = \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1},$$

$$\hat{u}_1 = u_1 \frac{\hat{u}_2 + u_1 \tanh(u_1 h_1)}{u_1 + \hat{u}_2 \tanh(u_1 h_1)},$$

$$\hat{u}_n = u_n \frac{\hat{u}_{n+1} + u_n \tanh(u_n h_n)}{u_n + \hat{u}_{n+1} \tanh(u_n h_n)},$$

$$\hat{u}_N = u_N, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

式中: r_{TE} 为层状大地的反射系数; $u_n = \sqrt{\lambda^2 - k_n^2}$, 其中 k_n 为第 n 层的波数, 满足 $k_n^2 = -i\omega\mu_n\sigma_n$, 其中 μ_n 、 σ_n 分别为第 n 层的磁导率及电导率, 通常认为大地的磁导率等于自由空间的磁导率, 即 $\mu_n = \mu_0$; ω 为发射线圈发射角频率; h_n 为第 n 层的厚度; 满足层状大地模型最底层即第 N 层 $\hat{u}_N = u_N$ 。当 $N=1$ 时, 为均匀大地模型, 此时 $r_{TE} = (\lambda - u_1)/(\lambda + u_1)$ 。

可知, 若 $y_r \equiv 0$ 时, G_{ab}^S 会受到收发线圈的水平距离 x_r (即为收发距 ρ)以及收发线圈的高度和(即 $2h$)的影响。而利用9种的线圈架构下的二次场实部、虚部分别与相应一次场的比值, 则可以得到相应线圈架构下同相分量(In-phase)与正交分量(Quadrature)的百万分之一(10^{-6})^[6]。

2 姿态旋转不变量及其姿态校正

为了描述吊舱姿态的旋转变化, 本工作以吊舱的中心点作为坐标原点建立了双坐标系, 如图3所示。一个为吊舱平行飞行时的惯性坐标系(x, y, z), 其中 x 轴为水平且与飞行方向平行, y 轴为水平且与飞行方

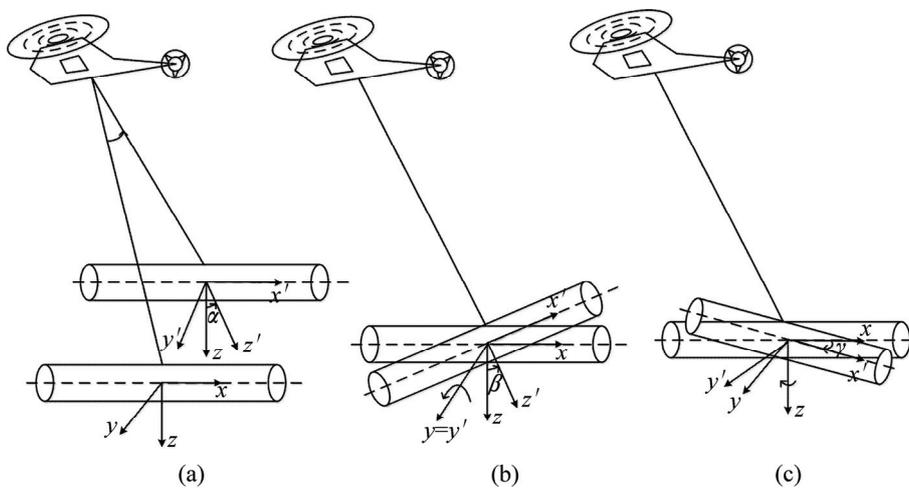


图3 吊舱姿态旋转变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bird attitude changes: (a) Roll rotation; (b) Pitch rotation; (c) Yaw rotation

向垂直,而 z 轴与飞行方向垂直,且垂直向下。一个为吊舱姿态发生变化后的吊舱坐标系(x' , y' , z'),当吊舱平直飞行时,吊舱坐标系与惯性坐标系重合。可知吊舱可能会发生翻滚、俯仰、偏航3种姿态旋转。如果直升机偏离正常的航线将导致吊舱绕 x' 轴旋转,即翻滚旋转;如果飞行的速度发生变化,吊舱会出现首尾摇摆绕 y' 轴旋转,即俯仰旋转;当飞机发生旋转或吊舱侧面有风吹过时,吊舱会绕 z' 轴旋转,即偏航旋转。

已知在飞行探测的过程中,吊舱的翻滚角 α 及俯仰角 β 均在 $\pm 90^\circ$ 之间变化,因此满足翻滚角 α 及俯仰角 β 的余弦值恒为正值。为了便于分析,本工作采用固定于吊舱中心点处的激光高度计测量吊舱高度的变化,而不再考虑吊舱通过吊绳绕与飞机固定点的复杂运动^[12]。由图3可知,在探测平坦的大地时,系统收发距仅受俯仰角的影响,而高度变化会受到翻滚角 α 及俯仰角 β 的影响^[10,12]。已知系统未发生姿态旋转时的收发距为 ρ ,而在发生姿态旋转后,系统的实际收发距变为 ρ' 。吊舱的实际飞行高度为 h ,而由激光高度计测得的高度为 h' ,可得式(5)。正是由于姿态旋转前后系统收发距发生了变化、系统实际高度与测量高度不同,使得三种常用线圈架构下的二次场出现位置误差:

$$\rho' = \rho \cos \beta, h' = \frac{h}{\cos \alpha \cos \beta} \quad (5)$$

由于收发线圈固定于吊舱之中,因此具有与吊舱相同的姿态变化。在单独对收发线圈进行分析时,分别定义线圈姿态未发生旋转时的惯性坐标系(x , y , z)及发生姿态旋转后的线圈坐标系(x' , y' , z'),如图4所示。可知存在将惯性坐标系转化为线圈坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} ,该旋转矩阵由线圈绕 z 轴的旋转矩阵、绕 y 轴的旋转矩阵以及绕 x 轴的旋转矩阵间矩阵依次相乘而得,且满足 $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$ 。对于层状大地模型,其水平方向无电导率的变化,3种常用线圈架构对偏航旋转角不敏感,因此在下述的分析中,不再考虑偏航角 γ 的影响。

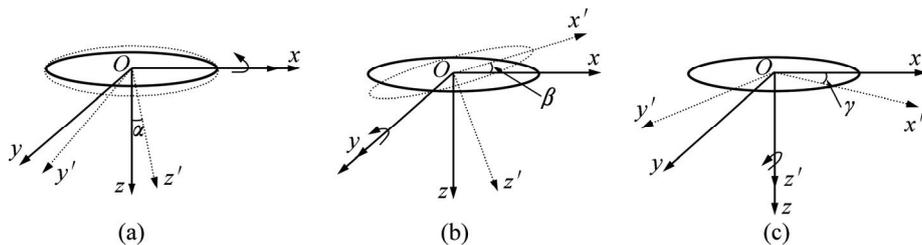


图4 线圈姿态旋转示意图

Fig. 4 Sketch of coil attitude changes: (a) Roll rotation; (b) Pitch rotation; (c) Yaw rotation

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

以下以HCP线圈架构为例进行说明。由于基于HCP线圈架构的仪器系统仅有 z 轴的发射磁矩,在发射线圈发生姿态旋转后,可由层状大地模型的格林函数张量矩阵与旋转后的发射磁矩 m'_z 作用,计算出层状大地模型下的二次场:

$$\mathbf{H}_s = \begin{bmatrix} H_{sx} \\ H_{sy} \\ H_{sz} \end{bmatrix} = \mathbf{G}^S \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m'_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于发射线圈与接收线圈之间采用刚性连接,具有相同的姿态变化,因此计算旋转后接收线圈接收到的二次场 \mathbf{H}'_s ,可由发射线圈旋转矩阵的逆 \mathbf{R}^{-1} 与 \mathbf{H}_s 作用获得。已知 $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$ 成立,可得:

$$\mathbf{H}'_s = \begin{bmatrix} H'_{sx} \\ H'_{sy} \\ H'_{sz} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} H_{sx} \\ H_{sy} \\ H_{sz} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T \mathbf{G}^S \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m'_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

因为HCP线圈架构只有 z 轴向的接收,只能接收 H'_{sz} 分量,可得:

$$H'_{sz} = H_{sx} d_{13} + H_{sy} d_{23} + H_{sz} d_{33} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} H'_{sz} = & [(d_{13} G_{xx}^S + d_{23} G_{xy}^S + d_{33} G_{xz}^S) d_{13} + \\ & (d_{13} G_{yx}^S + d_{23} G_{yy}^S + d_{33} G_{yz}^S) d_{23} + \\ & (d_{13} G_{zx}^S + d_{23} G_{zy}^S + d_{33} G_{zz}^S) d_{33}] m'_z = \\ & [(d_{13}^2 G_{xx}^S + d_{23}^2 G_{yy}^S + d_{33}^2 G_{zz}^S) + \\ & d_{13} d_{23} (G_{xy}^S + G_{yx}^S) + d_{13} d_{33} (G_{xz}^S + G_{zx}^S) + \\ & d_{23} d_{33} (G_{yz}^S + G_{zy}^S)] m'_z \end{aligned} \quad (10)$$

由于航空频率域电磁法仪器的飞行高度远大于其收发距,满足重叠偶极子模型,此时3种常用线圈架构下二次场的格林函数满足的近似关系等式成立,可得:

$$G_{xx}^S \cong G_{yy}^S \cong G_{zz}^S / 2 \quad (11)$$

将式(2)及(11)中的关系等式代入式(10),可得:

$$H'_{sz} = (d_{13}^2 G_{xx}^S + d_{23}^2 G_{yy}^S + d_{33}^2 G_{zz}^S) m'_z \cong 0.5(1 + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta) G_{zz}^S m'_z \quad (12)$$

同理,在分别考虑VCA线圈架构(x 轴发射, x 轴接收)及VCP线圈架构(y 轴发射, y 轴接收)的情况下,可得 H'_{sx} 、 H'_{sy} 分量:

$$H'_{sx} = (d_{11}^2 G_{xx}^S + d_{21}^2 G_{yy}^S + d_{31}^2 G_{zz}^S) m'_x \cong (2 - \cos^2 \beta) G_{xx}^S m'_x \quad (13)$$

$$H'_{sy} = (d_{12}^2 G_{xx}^S + d_{22}^2 G_{yy}^S + d_{32}^2 G_{zz}^S) m'_y \cong (1 + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta) G_{yy}^S m'_y \quad (14)$$

式中: m'_x 、 m'_y 、 m'_z 分别为 x 、 y 、 z 轴向的发射磁矩,具有相同的发射频率且满足 $m'_x = m'_y = m'_z = m'$ 。

$$d_{11}^2 + d_{12}^2 + d_{13}^2 = 1, d_{21}^2 + d_{22}^2 + d_{23}^2 = 1, d_{31}^2 + d_{32}^2 + d_{33}^2 = 1 \quad (15)$$

对式(12)、(13)和(14)求和,进而可以得到:

$$I = H'_{sx} + H'_{sy} + H'_{sz} = (G_{xx}^S + G_{yy}^S + G_{zz}^S) m' = 2G_{zz}^S m' \quad (16)$$

可知,3种常用的线圈架构在姿态发生变化时,其测量的二次场均包含有姿态角信息(如式(5),(12),(13)及(14)所示),因此需要测量吊舱的姿态角信息以及利用式(11),实现对姿态角误差的校正^[14-15]。参照磁梯度张量姿态旋转不变量,可把式(16)中的 I 称为电磁张量姿态旋转不变量,由于不变量与姿态角 α 、 β 均无关,对姿态角变化引起的方向误差不敏感,因此不再需要对不变量的方向误差进行校正。与单独采用HCP线圈架构测量 H'_{sz} 类似,通过对不变量进行处理与反演,可以获取大地电导率的分布信息。在测量不变量时,由于需要测得3种常用线圈架构在相同姿态角时的二次场,因此系统必须具有三轴发射、三轴接收的线圈架构;而为了避免同频信号的相互影响,根据频率域电磁法仪器的工作原理,3种线圈架构可以在3个不同的时间内(总时间为一个测量周期,如0.1 s)分时发射与接收相同频率(单个或多个合成)的磁场信号,此时可以测得一个电磁张量姿态旋转不变量;关于不变量更为复杂且具体的实现方式,可见李德志等^[30]

的专利。需要指出的是,在系统姿态角变化的过程中,3种线圈架构下二次场及不变量之间具有相同的收发距及高度。而在实际测量的过程中,不变量的收发距及高度会受到姿态角变化的影响,从而产生位置误差,因此需要对不变量的位置误差进行校正。

在满足重叠偶极子模型的情况下,由式(12)、(13)及(16)联立可以得到吊舱翻滚角及俯仰角的余弦值,再通过式(5)求得系统的实际收发距以及飞行高度值,从而可以实现不变量位置误差的校正。

$$\rho' = \rho \sqrt{2 - 4H'_{sx} / I}, h = h' \sqrt{4H'_{sz} / (I - 1)} \quad (17)$$

3 模型仿真

下述的模型仿真参数以Fugro航空勘探公司的RESOLVE航空电磁法系统为例,已知RESOLVE系统的收发距为7.9 m,吊舱以30 m的高度飞行^[5],采用的发射频率为10 kHz,均匀大地的电导率为50 $\Omega \cdot m$ 。由于传统姿态误差的校正算法以及不变量的位置误差校正算法均需满足重叠偶极子模型。以下仿真首先对重叠偶极子模型进行了验证;进一步分析并校正了系统收发距以及高度的变化引起的不变量位置误差;最后对不变量姿态校正算法的校正效果进行分析。

3.1 重叠偶极子模型验证

在系统飞行高度远大于其收发距时,满足重叠偶极子模型,此时三种常用线圈架构下二次场与不变量之间满足的近似关系等式成立,即式(11)、(16)的成立。为进一步验证重叠偶极子模型的正确性,在满足相同收发距、高度以及发射磁矩的情况下,分别定义系统未发生姿态旋转时的 H_{sx} 、 H_{sy} 与 $0.5H_{sz}$ 的相对误差 Δe_{xx} 、 Δe_{yy} 以及系统发生任意姿态角旋转时的 I_0 与未发生姿态旋转时的 $2H_{sz}$ 的相对误差 Δe_0 ,如式(18)所示:

$$\Delta e_{xx} = \frac{H_{sx} - 0.5H_{sz}}{H_{sx}}, \Delta e_{yy} = \frac{H_{sy} - 0.5H_{sz}}{H_{sy}}, \Delta e_0 = \frac{I_0 - 2H_{sz}}{I_0} \quad (18)$$

需要指出的是,相对误差 Δe_{xx} 、 Δe_{yy} 和 Δe_0 的实部、虚部的求取是通过式(18)中分子与分母的实部、虚部分别做比值得到。采用上述的仿真参数,分别考虑收发距在1~10 m间变化、高度在20~60 m间变化以及频率电导率乘积在20 Hz·S/m~2 MHz·S/m间变化对 Δe_{xx} 、 Δe_{yy} 和 Δe_0 的影响。

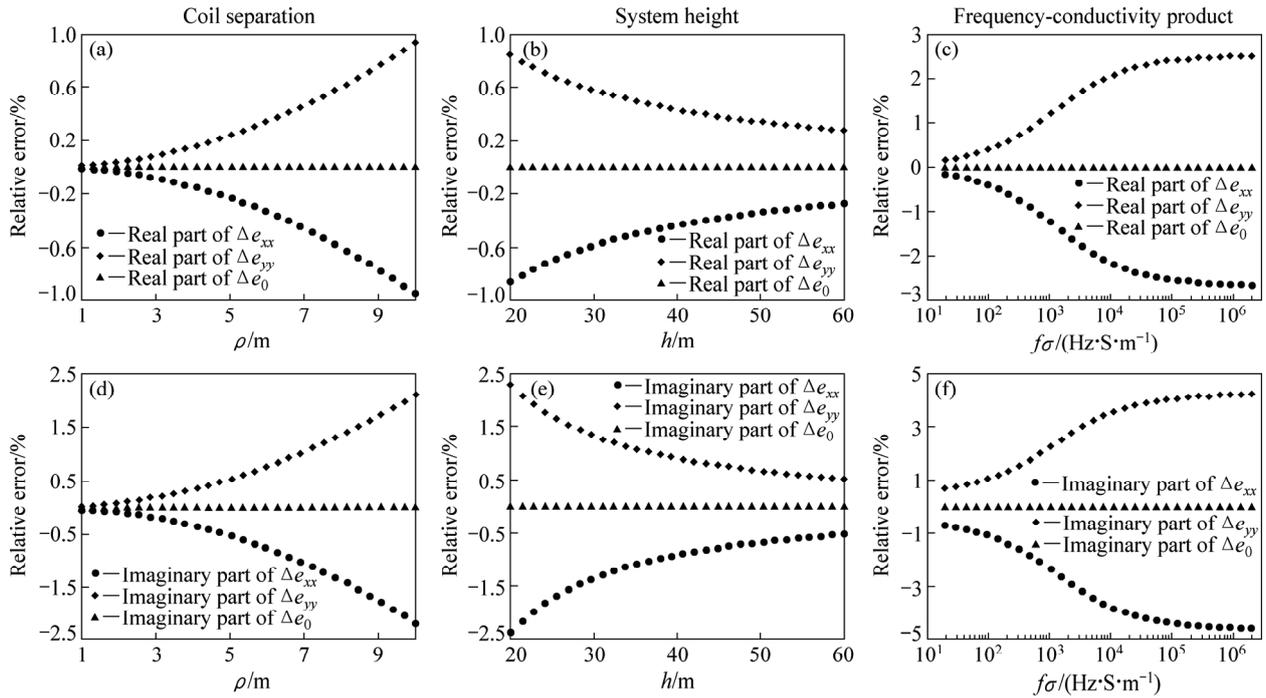


图 5 Δe_{xx} 、 Δe_{yy} 和 Δe_0 收发发距、高度以及频率电导率乘积的影响

Fig. 5 Influences of coil separations, system heights and frequency-conductivity products on real parts (a)–(c) and imaginary parts (d)–(f) of Δe_{xx} , Δe_{yy} and Δe_0

由图 5 可知, Δe_{yy} 的实部与虚部均随着系统收发距与频率电导率乘积的增大而增大, 随着高度的减小而增大, 可以达到 4.21%; 而 Δe_{xx} 的实部与虚部幅度具有与 Δe_{yy} 相同的变化趋势, 且符号相反, 可以达到 -4.6%; 在 5% 的精度要求下, 3 种线圈架构下二次场满足的近似关系等式即式(11)成立; Δe_0 的实部与虚部恒为零, 说明不变量的幅度两倍于 HCP 线圈架构下的二次场, 且并不随着系统收发距、高度以及频率电导率乘积的变化而变化。由于相较于虚部, Δe_{xx} 、 Δe_{yy} 、 Δe_0 的实部受收发距、高度以及频率电导率的乘积的影响较小, 因此在求取系统实际的收发距以及高度时, 采用实测的 H'_{xx} 、 H'_{zz} 以及 I 的实部代入式(17)中以实现对不变量位置误差的校正。

3.2 位置误差分析及校正

由式(5)可知, 航空频率域电磁法仪器在飞行的过程当中, 由于吊舱发生姿态旋转, 系统的收发距会受到俯仰角的影响而减小, 而由激光高度计测得的系统高度则会受到翻滚角及俯仰角的影响而增大。此时, 若不考虑系统收发距的变化, 或直接采用测得的高度信息, 将会导致实测的二次场值与理论值出现偏差, 从而产生位置误差。假设由于翻滚角以及俯仰角影

响, 系统的收发距最大减小了 1 m, 而高度最大增加了 10 m, 以下分别分析 3 种常用线圈架构下二次场及不变量收发距以及高度的影响。

以收发距为 7.9 m 时测得的二次场作为参考, 可得 3 种线圈架构下二次场及不变量的同相分量、正交分量在其他收发距下的相对误差, 如图 6 所示。可知, 收发距 7.9 m 处同相分量及正交分量的相对误差均为零。3 种线圈架构下二次场及不变量同相及正交分量的相对误差均随着收发距的减小而正向增大, 且为线性变化, 相较于正交分量, 同相分量受收发距变化的影响较小。其中 VCA 线圈架构的相对误差受收发距的影响最大, 分别可以达到 0.42%, 0.95%; HCP 线圈架构及不变量的相对误差次之, 分别可以达到 0.28%和 0.63%; 而 VCP 线圈架构的相对误差最小, 分别可以达到 0.14%和 0.31%。

以吊舱实际飞行高度为 30 m 时测得的二次场作为参考, 可得 3 种常用线圈架构下二次场及不变量的同相分量、正交分量在其他高度下的相对误差, 如图 7 所示。由图 7 可知, 高度为 30 m 处的相对误差均为零。3 种常用线圈架构下二次场及不变量同相及正交分量的相对误差均随着高度的增大而负向增大。可知相对误差的变化均为线性变化。其中 VCA 线圈架构

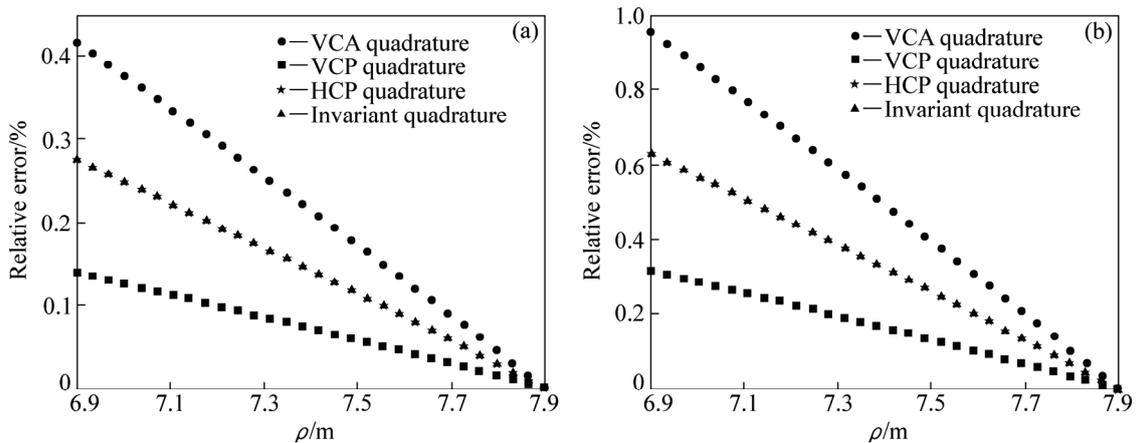


图 6 3 种常用线圈架构下二次场及不变量受收发距的影响

Fig. 6 Influences of coil separation on in-phase components (a) and quadrature components (b) of secondary fields of three common configurations and the invariant

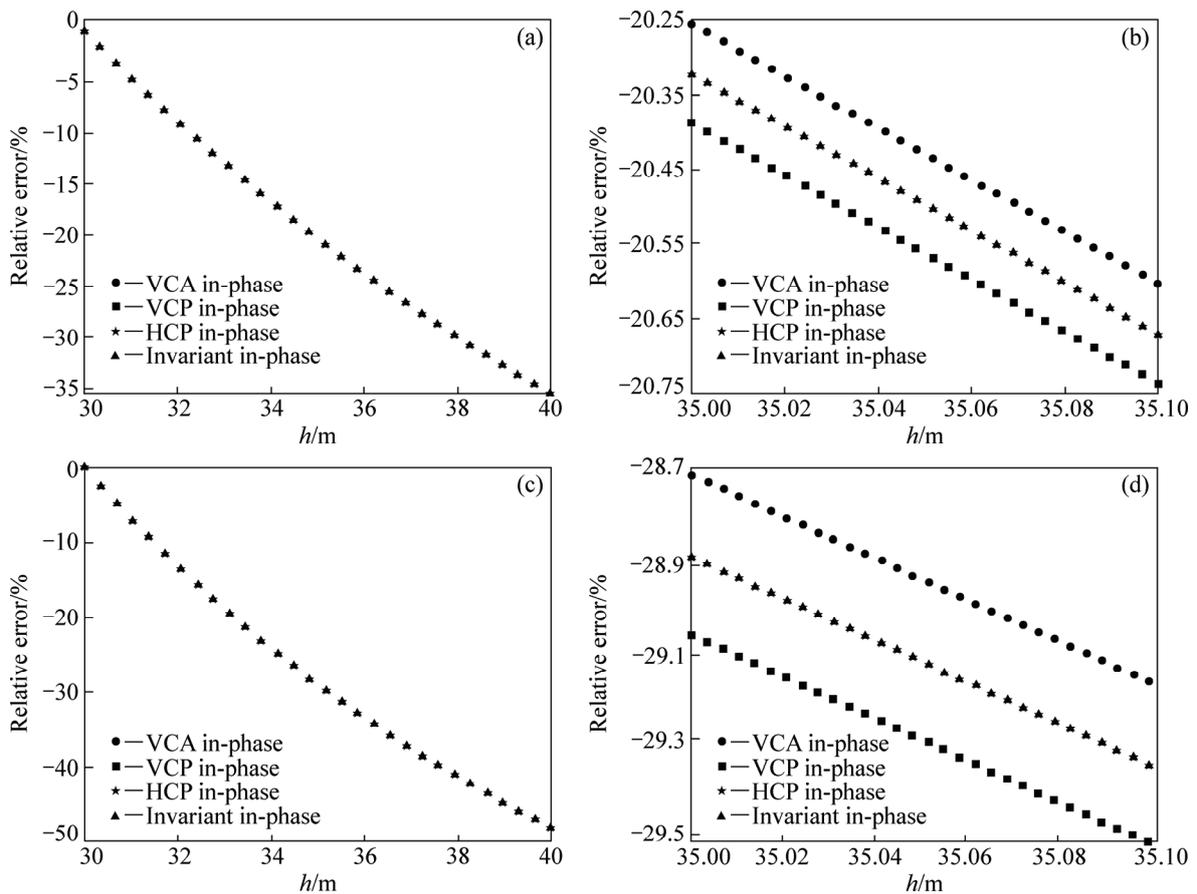


图 7 3 种常用线圈架构下二次场及不变量受高度的影响

Fig. 7 Influence of system height on in-phase components (a) and quadrature components (c) of secondary fields of three common configurations and invariant (In order to compare the influence, the influence of system height range of 35–35.1 m is specified by in-phase components (b) and quadrature components (d))

下二次场的相对误差受高度的影响最小, 分别可以达到-35.45%和-47.72%; HCP 线圈架构下二次场及不变

量的相对误差次之, 分别可以达到-35.54%和-47.94%; 而 VCP 线圈架构下二次场的相对误差受高

度的影响最大, 分别可以达到-35.64%和-48.16%。

由上述的分析可知, 3 种常用线圈架构下二次场与不变量均会受到收发距及高度变化的影响, 在收发距及高度变化较小时, 呈现线性变化, 且受高度变化的影响较大。因此需要对系统收发距及高度变化引起的位置误差进行校正。

由图 8 可知, 采用式(17)进行校正后, 收发距的相对误差随着频率电导率乘积的增大而正向增大并逐渐趋于稳定, 随着 α 角及 β 角的增大而减小, 可以达到 1.26%, 且受 β 角的影响较大; 高度的相对误差随着频率电导率乘积的增大而增大并逐渐趋于稳定, 并随着 β 角的增大而正向增大, 可以达到 0.124%, 而随着 α 角的增大而负向增大, 可以达到-0.14%, 且受 α 角的影响稍大于 β 角。

3.3 与传统姿态校正算法的比较

由于传统的姿态校正算法采用姿态角测量装置,

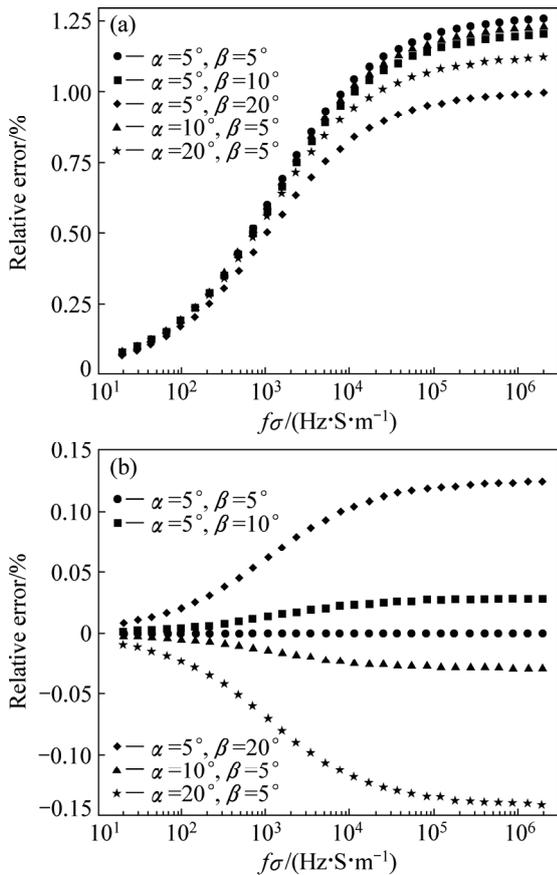


图 8 校正后, 姿态角取不同的值时系统收发距及高度受频率电导率乘积的影响

Fig. 8 Influence of frequency-conductivity products on coil separation (a) and system height (b) with specific attitude angles after correction

能够准确地测量出系统的姿态角信息, 进而可以较准确地校正位置误差, 而在校正方向误差时, 基于重叠偶极子模型, 利用了 3 种线圈架构下二次场间的近似关系等式即式(11), 会受到系统收发距、高度以及频率电导率乘积的影响而产生剩余误差。在姿态校正之前, 3 种线圈架构下二次场在姿态角达到 20° 时, 同相及正交分量的相对误差接近于 12%^[14, 31]。由图 9 可知, 在姿态校正之后, VCA 线圈架构同相与正交分量的相对误差均随着频率电导率乘积的增大而正向增大并逐渐趋于稳定, 分别可以达到 0.48%和 0.82%, 随着 β 角的增大而增大, 且基本不受 α 角的影响; VCP 线圈架构的相对误差随着频率电导率乘积的增大而负向增大并逐渐趋于稳定, 分别可以达到-0.52%和-0.86%, 随着 α 角的增大而反向增大, 且基本不受 β 角的影响; HCP 线圈架构的相对误差随着频率电导率乘积以及 β 角的增大反向于 VCA 线圈架构的相对误差, 分别可以达到-0.11%和-0.18%, 而随着频率电导率乘积以及 α 角的增大反向于 VCP 线圈架构相对误差, 分别可以达到 0.124%和 0.21%, 且受 α 角的影响略大于 β 角。而 HCP 线圈架构具有最好的校正效果。

已知不变量对方向误差不敏感, 但在校正位置误差时, 同样基于重叠偶极子模型, 采用 3 种线圈架构下二次场及不变量之间满足的近似关系等式, 也会受到系统收发距、高度以及频率电导率乘积的影响而产生剩余误差。由图 10 所示, 姿态误差校正后, 不变量同相以及正交分量的相对误差随着频率电导率乘积的增大而增大并逐渐趋于稳定, 分别可以达到 0.44%和 0.61%, 均随着 β 角的增大而正向增大, 随着 α 角的增大而负向增大, 且受 β 角的影响较大。

由上述分析可知, 不变量的姿态校正算法可以实现传统姿态校正算法在 3 种常用线圈架构中的校正效果。为进一步验证该算法的可行性, 选择较为常见的 H 型及 K 型三层大地模型, 其中 H 型三层大地模型的电阻率分别为 1000、10 和 100 Ωm , 相应的高度分别为 50 和 20 m; K 型三层大地模型的电阻率分别 1000、10000 和 100 Ωm , 相应的高度分别为 50 和 20 m。采用上述的模型仿真参数, 研究在两种大地模型, 且 $\alpha=0^\circ$ 的情况下, 不变量同相与正交分量的相对误差受 β 角的影响, 如图 11 所示。可知, 在两种大地模型下不变量同相及正交分量的相对误差随着 β 角的增大而增大, 且均小于 0.1%, 从而验证了不变量姿态校正算法的可行性。

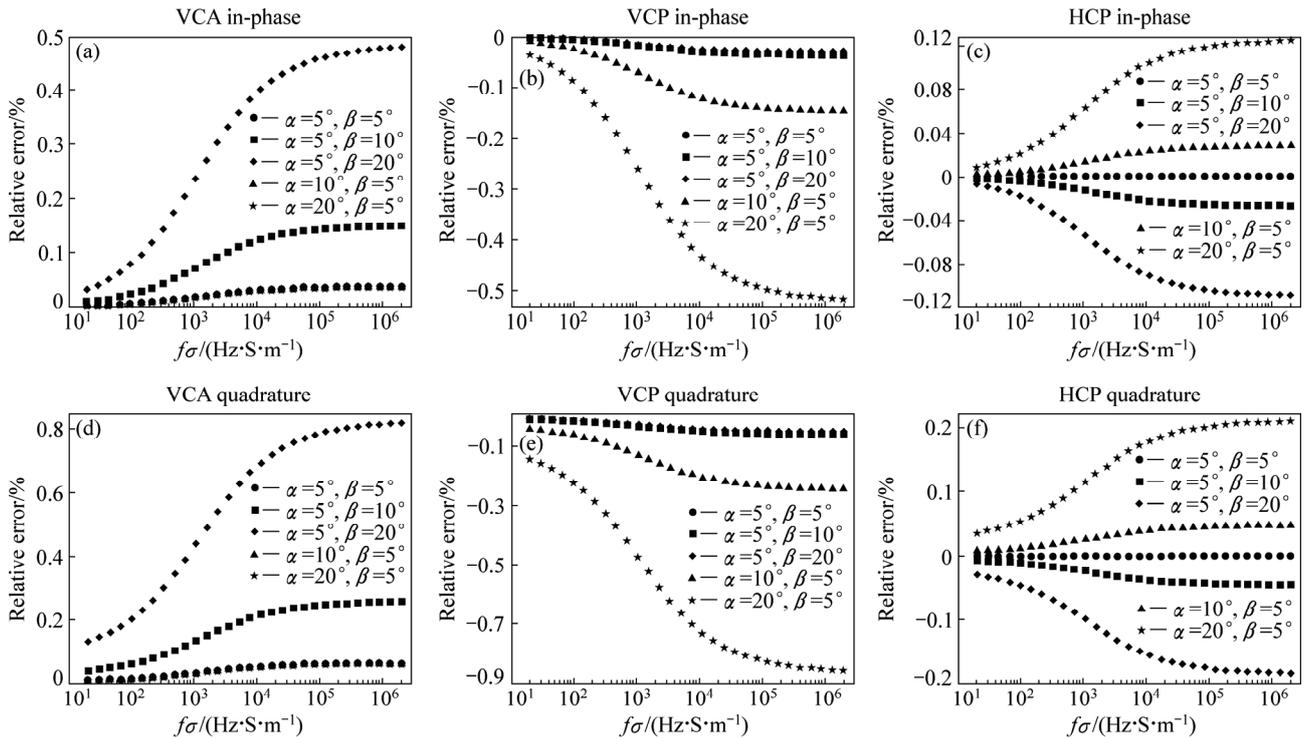


图9 校正后, 姿态角取不同值时3种常用线圈架构下二次场受频率电导率乘积的影响

Fig. 9 Influences of frequency-conductivity products on in-phase components and quadrature components of secondary fields of VCA configuration, VCP configuration and HCP configuration with specific attitude angles after correction

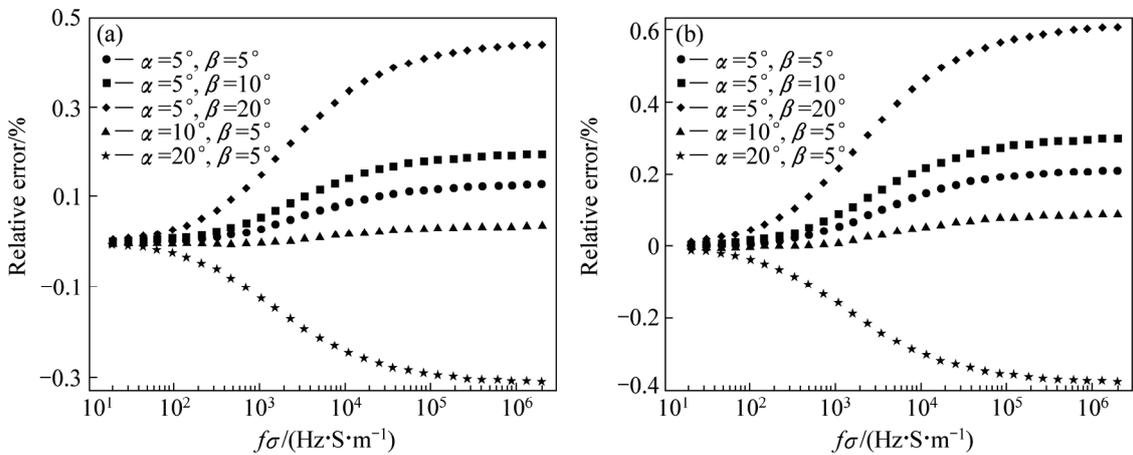


图10 校正后, 姿态角取不同值时不变量受频率电导率乘积的影响

Fig. 10 Influence of frequency-conductivity products on in-phase components (a) and quadrature components (b) of invariant with specific attitude angles after correction

4 结论

1) 在满足重叠偶极子模型的情况下, 3种线圈架构下二次场及不变量之间满足近似的关系等式成立, 其相对误差均会随着系统收发距的增大、高度的降低

以及频率电导率乘积的增大而增大, 且相较于虚部, 实部的相对误差较小。

2) 电磁张量姿态旋转不变量本身对方向误差敏感, 却受到系统收发距以及高度变化的影响, 其中高度变化引起的误差较大。基于重叠偶极子模型, 可以实现对收发距以及高度的高精度校正, 校正后的相对误差幅度分别小于 1.26%和 0.14%。而采用校正后

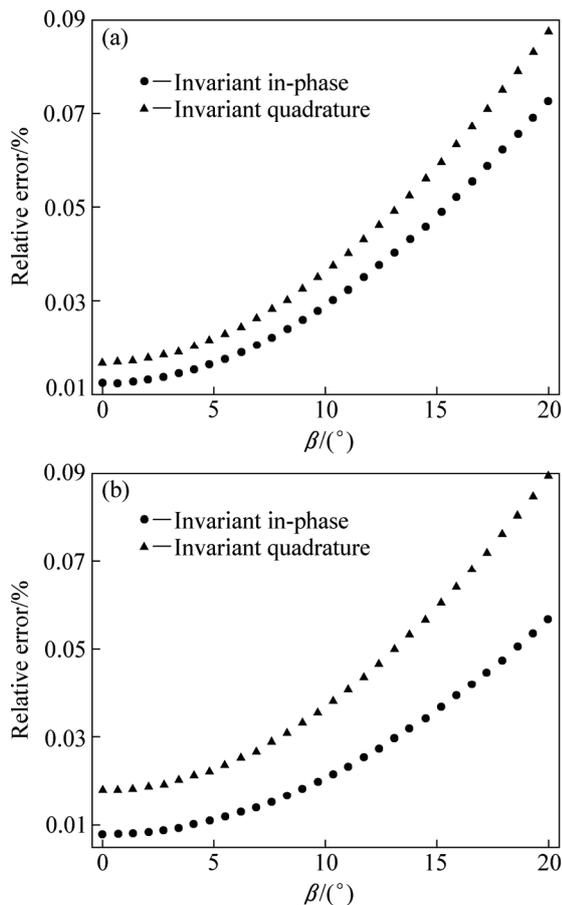


图 11 校正后常见 H 型及 K 型三层大地模型下不变量受俯仰角的影响

Fig. 11 Influence of pitch angles on in-phase and quadrature components of invariant in H-type three-layer earth model (a) and K-type three-layer earth model (b) after correction

的收发距以及高度值可以实现不变量位置误差的校正。

3) 传统的姿态校正算法, 采用测得的吊舱姿态角信息, 可以较大地抑制 3 种常用线圈架构中的姿态误差, 其中 HCP 线圈架构可以达到最好的姿态校正效果。而在无需测量吊舱姿态角信息的情况下, 电磁张量姿态旋转不变量的姿态校正算法可以实现相接近的校正效果。

REFERENCES

[1] SIEMON B. Electromagnetic methods—frequency domain[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 155–178.
 [2] WON I J. Small frequency-domain electromagnetic induction sensors: how in the world does a small broadband EMI sensor with little or no source-receiver separation work?[J]. The

Leading Edge, 2003, 22(4): 320–322.
 [3] FRASER D C. The multicoil II airborne electromagnetic system[J]. Geophysics, 1979, 44(8): 1367–1394.
 [4] FRASER D C. Dighem resistivity techniques in airborne electromagnetic mapping[J]. Airborne resistivity mapping: Geological Survey of Canada, 1986: 86–22.
 [5] CAIN M J. Resolve survey for US geological survey[R]. Montana: East Poplar Oil Fields, 2004.
 [6] WON I J, OREN A, FUNAK F. GEM-2A: A programmable broadband helicopter-towed electromagnetic sensor[J]. Geophysics, 2003, 68(6): 1888–1895.
 [7] SON K H. Interpretation of electromagnetic dipole-dipole frequency sounding data over a vertically stratified earth[D]. North Carolina: North Carolina State University, 1985: 53–88.
 [8] WON I J, SMITS K. Airborne electromagnetic bathymetry[J]. Geosurvey, 1991, 27(3): 297–319.
 [9] DESZCZ-PAN M, FITTERMAN D V, LABSON V F. Reduction of inversion errors in helicopter EM data using auxiliary information[J]. Exploration Geophysics, 1998, 29(1/2): 142–146.
 [10] FRASER D C. Resistivity mapping with an airborne multicoil electromagnetic system[J]. Geophysics, 1978, 43(1): 144–172.
 [11] HOLLADAY J S, LO B, PRINSENBERG S K. Bird orientation effects in quantitative airborne electromagnetic interpretation of pack ice thickness sounding[C]//MTS/IEEE Conference Proceedings, Halifax: OCEANS'97, 1997(2): 1114–1119.
 [12] DAVIS A C, MACNAE J, ROBB T. Pendulum motion in airborne HEM systems[J]. Exploration Geophysics, 2006, 37(4): 355–362.
 [13] DAVIS A, MACNAE J, HODGES G. Predictions of bird swing from GPS coordinates[J]. Geophysics, 2009, 74(6): F119–F126.
 [14] YIN C, FRASER D C. Attitude corrections of helicopter EM data using a superposed dipole model[J]. Geophysics, 2004, 69(2): 431–439.
 [15] 曲昕馨, 李桐林, 王 飞. 直升机吊舱姿态变化对电磁场测量的影响规律及其校正方法研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1310–1321.
 QU Xin-xin, LI Tong-lin, WANG Fei. A Study on the effect of bird's attitude on helicopter EM data and the correction method[J]. Chinese J Geophys, 2014, 57(4): 1310–1321.
 [16] 嵇艳鞠, 林 君, 关珊珊, 巩源峰. 直升机航空 TEM 中心回线线圈姿态校正的理论研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 171–176.
 JI Yan-ju, LIN Jun, GUAN Shan-shan, YU Sheng-bao, GONG Yuan-feng. Theoretical study of concentric loop coils attitude correction in helicopter-borne TEM[J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(1): 171–176.
 [17] 王 琦, 林 君, 于生宝, 李冰冰, 朱凯光. 固定翼航空电磁系统的线圈姿态及吊舱摆动影响研究与校正[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3741–3750.

- WANG Qi, LIN Jun, YU Sheng-bao, GONG Yuan-feng, LI Bing-bing, ZHU Kai-guang. Study on influence and correction of coil attitude and bird swing for the fixed-wing time-domain electromagnetic system[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(11): 3741–3750.
- [18] 吴招才, 刘天佑. 磁力梯度张量测量及应用[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(3): 107–110.
- WU Zhao-cai, LIU Tian-you. Magnetic gradient tensor: its properties and uses in geophysics[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(3): 107–110.
- [19] CLARK D A. New methods for interpretation of magnetic vector and gradient tensor data II: application to the Mount Leyshon anomaly, Queensland, Australia[J]. *Exploration Geophysics*, 2013, 44(2): 114–127.
- [20] BEIKI M, CLARK D A, AUSTIN J R, FOSS C A. Estimating source location using normalized magnetic source strength calculated from magnetic gradient tensor data[J]. *Geophysics*, 2012, 77(6): J23–J37.
- [21] CLARK D A. New methods for interpretation of magnetic gradient tensor data[J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2012(1): 1–11.
- [22] SUI Yang-yi, LI Guang, WANG Shi-long, LIN Jun. Asphericity errors correction of magnetic gradient tensor invariants method for magnetic dipole localization[J]. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2012, 48(12): 4701–4706.
- [23] 吕俊伟, 迟 铖, 于振涛, 毕 波, 宋庆善. 磁梯度张量不变量的椭圆误差消除方法研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(19): 190701-1–190701-8.
- LÜ Jun-wei, CHI Cheng, YU Zhen-tao, BI Bo, SONG Qing-shan. Research on the asphericity error elimination of the invariant of magnetic gradient tensor[J]. *Acta Phys Sin*, 2015, 64(19): 190701-1–190701-8.
- [24] WEAVER J T, AGARWAL A K, LILLEY F E M. Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants[J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 141(2): 321–336.
- [25] 王立凤, 晋光文, 孙 洁, 白登海. 地球电磁响应函数的旋转不变量特征[J]. *物探化探计算技术*, 2000, 22(4): 306–311.
- WANG Li-feng, JIN Guang-wen, SUN Jie, BAI Deng-hai. The characteristics of rotational invariants of the earth electromagnetic response function[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2000, 22(4): 306–311.
- [26] 李爱勇, 柳建新, 杨 生. 大地电磁资料处理中有效视电阻率的利用[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 33(5): 496–500.
- LI Ai-yong, LIU Jian-xin, YANG Sheng. Utilization of effective apparent resistivity in MT data processing and interpretation[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 33(5): 496–500.
- [27] 阮 帅, 张 炯, 孙远彬, 王绪本. 基于三维正演的音频大地电磁阻抗相位不变量校正技术[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(2): 685–696.
- RUAN S, ZHANG J, SUN Y B, WANG Xu-ben. AMT impedance phase invariant correction based on 3D MT modeling technology[J]. *Chinese J Geophys*, 2015, 58(2): 685–696.
- [28] TØLBØLL R J, CHRISTENSEN N B. Sensitivity functions of frequency-domain magnetic dipole-dipole systems[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): F45–F56.
- [29] NABIGHIAN M N. *Electromagnetic methods in applied geophysics: Volume 1, Theory*[M]. USA: Society of Exploration Geophysicists, 1988: 131–311.
- [30] 李德志, 李 光, 渠晓东, 方广有, 黄 玲. 一种获取张量旋转不变量的频率域电磁法系统: 中国, CN104597510A[P]. 2015–05–06.
- LI De-zhi, LI Guang, QU Xiao-dong D, FANG Guang-you, HUANG Ling. A method of obtaining the rotation tensor invariants for frequency domain electromagnetic system: China, CN104597510A[P]. 2015–05–06.
- [31] FITTERMAN D V, YIN C. Effect of bird maneuver on frequency-domain helicopter EM response[J]. *Geophysics*, 2004, 69(5): 1203–1215.

Attitude corrections of attitude rotational invariant in airborne frequency-domain electromagnetic method

LI Guang^{1,2}, QU Xiao-dong^{1,2}, HUANG Ling^{1,3}, FANG Guang-you^{1,3}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: There exist attitude errors resulting from the change of coupling between the coils and the earth for attitude angle change in the course of flight measurement of airborne frequency domain electromagnetic instruments. According to differences of sources, the attitude errors can be divided into the direction errors and the position errors. In order to eliminate the effect of attitude errors, this study firstly derives the electromagnetic tensor attitude rotational invariant from the coil configuration of tri-axial transmitter and tri-axis receiver in layered earth model. Then the cosines of roll angle and pitch angle can be deduced on the basis of superposed dipole model, achieving the correction of position errors of invariant. Compared with the traditional attitude correction algorithm, the attitude correction algorithm of invariant does not need to measure any attitude information. From the simulation results, the attitude correction algorithm of invariant can achieve the similar effects of traditional attitude correction algorithm in three common coil configurations. In the common H-type and K-type three-layer earth model, the relative error of invariant after correction is less than 0.1%, which proves the feasibility of the attitude correction algorithm of invariant.

Key words: airborne frequency domain electromagnetic method; attitude error; electromagnetic tensor; attitude rotational invariant; superposed dipole model

Foundation item: Project (ZDYZ2012-1-03-05) supported by National Major Scientific Research Instruments and Equipments Development Project

Received date: 2015-12-19; **Accepted date:** 2016-04-30

Corresponding author: LI Guang; Tel: +86-18811782541; E-mail: liguang706@163.com

(编辑 何学锋)