

# 航磁补偿系统延迟偏差补偿方法研究\*

吴佩霖<sup>1,2,3</sup>, 黄玲<sup>1,3</sup>, 张群英<sup>1,3</sup>, 方广有<sup>1,3</sup>

(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:** 航空磁法勘探是一种重要的地球物理勘探方法, 由于飞机磁干扰会对光泵磁力仪测量的数据产生严重的影响, 因此有效的补偿飞机磁干扰具有重要的意义。提出了一种非线性航磁补偿方法, 通过对信号时间序列的加权, 实现对当前时刻输出信号的预测, 通过 L-M (Levenberg-Marquardt) 算法求解修正同步误差后的非线性航磁补偿模型。仿真结果表明, 该非线性航磁补偿方法可有效的解决传统航磁补偿方法无法补偿通道间延迟的问题, 有效地降低各类信号延迟导致的补偿偏差, 补偿后信号的标准差降低至  $10^{-4}$  nT/m 量级, 该剩余残差水平与光泵磁力仪的本底噪声处于同一量级, 符合高精度航磁勘探的要求。通过野外模拟飞行实验对理论分析和仿真结果进行了验证。

**关键词:** 航磁勘探; 航磁补偿; 光泵磁力仪; L-M 算法

中图分类号: TH762.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

## Aeromagnetic compensation method for the interference magnetic fields caused by system delay

Wu Peilin<sup>1,2,3</sup>, Huang Ling<sup>1,3</sup>, Zhang Qunying<sup>1,3</sup>, Fang Guangyou<sup>1,3</sup>

(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:** Aeromagnetic exploration is an essential issue in the geophysics. The data measured by optically pumped magnetometers (OPM) is seriously affected by the interference magnetic fields generated by the aircraft. Therefore, aeromagnetic compensation is very essential, and a nonlinearity aeromagnetic compensation method is proposed. Firstly, the weighted signal sequences are used to predict the output of the sensors. Then, Levenberg-Marquardt (L-M) algorithm is utilized to realize aeromagnetic compensation. The simulation results show that the nonlinearity aeromagnetic compensation method is effective to the interference magnetic fields caused by the delay between the sensors. The standard deviation of the compensated signal is decreased to  $10^{-4}$  nT/m. The residual error of the compensation signal is the same order as the noise floor of the OPMs. The proposed method can be applied to obtain high-quality aeromagnetic survey data. A field experiment is carried out to prove the validities of the theoretical analysis and the simulation results.

**Keywords:** aeromagnetic exploration; aeromagnetic compensation; optically pumped magnetometers (OPM); Levenberg-Marquardt (L-M) algorithm

## 1 引言

航空磁法勘探作为地球物理勘探领域中的重要方法被广泛使用<sup>[1-3]</sup>, 航磁勘探按观测场量的不同, 可以分为航空总场勘探、航空总场梯度勘探和航空矢量勘探。近

年来, 随着无人机技术的发展和飞行成本的降低, 以无人机作为搭载平台的航空磁法勘探技术受到广泛的关注, 国内外相关单位近些年开展了不少相关实验<sup>[4-5]</sup>, 勘探方式主要以航空总场勘探和总场梯度勘探为主。相比于单一探头航空总场勘探, 总场梯度数据不仅可以更有效地抑制外界干扰<sup>[6-10]</sup>, 分离不同深度场源, 而且可以为地质

目标体反演提供更丰富反演信息和约束条件,因而受到越来越多的重视。

在航磁勘探中,无论是航磁总场测量,还是航磁总场梯度测量,飞机的干扰磁场会对测量结果产生严重的影响。飞机磁场引入的干扰磁场将导致航磁异常数据成图时,出现条带、波纹等现象<sup>[11]</sup>,严重影响数据的反演和解释,因此在航磁梯度测量及数据处理时,飞机干扰磁场的去除显得尤为重要。

航磁勘探技术起源于二战时期磁异常反潜技术,由于飞机结构包含的铁磁性物质严重影响了探测的精度,Tolles W. E.<sup>[12-13]</sup>提出了航磁补偿模型,首次将飞机的干扰磁场分成3部分:恒定干扰磁场、感应干扰磁场、涡流干扰磁场,并给出了硬件补偿器的设计方案;其后,Leliak P<sup>[14]</sup>进一步完善了航磁补偿模型,针对模型中的复共线性问题,给出了正弦机动飞行的方式实现标定飞行,显著的提升了补偿器的补偿效果;20世纪80年代,Hardwick C. D.<sup>[15]</sup>在固定翼飞机平台上设计了一种全轴梯度航磁勘探系统,首次实现了全轴梯度航磁数据的补偿工作;其后Nelson J. B.<sup>[16-17]</sup>和Marcotte D等人<sup>[18]</sup>在这套实验机上进一步开展了一系列相关实验,包括低空飞行时系统噪声水平的评估,用地面测量标定值来预测空中噪声水平,以及飞机各组件噪声水平的评估。其中噪声水平的评估方法,部分研究采用品质因数(figure of merit, FOM)作为评估标准<sup>[19-20]</sup>,部分选用信号的标准差和提升比作为补偿结果的评估标准<sup>[7]</sup>,在近些年,加拿大RMS公司的研究人员对此给出了系统的论证,证实采用信号标准差作为评估标准的可行性和可靠性<sup>[21-22]</sup>。

在国内有众多研究单位开展该领域研究并且有丰富的成果涌现,主要有以下高校和研究所:1)早在20世纪80~90年代,中船重工715所吴文福等人就开展过航磁补偿研究,并成功应用于“海燕”机,在2013年该研究所王景然等人<sup>[23]</sup>进一步开展了相关工作;2)2009年,海军工程大学林春生研究组<sup>[24-25]</sup>相继开展了该领域的众多研究,采用FIR滤波器等方法对载体的干扰磁场进行了分析和补偿;3)在2010年以后,航遥中心以Y-12固定翼飞机作为搭载平台,研制了AGS863航磁全轴梯度勘探系统<sup>[26]</sup>,并利用该套航磁梯度设备实现了勘探飞行和数据的调平工作<sup>[27-30]</sup>;4)2013年,国防科学技术大学的李季等人<sup>[31-32]</sup>研究了高速载体磁干扰的补偿工作;5)2014年之后,哈尔滨工业大学的Dou ZH. J.等人<sup>[33-34]</sup>和Zhao G. Y.等人<sup>[35]</sup>开展了磁异常数据采集,目标探测以及平台干扰补偿等工作,引入了小波分析等卓有成效的方法;6)2015年吉林大学程德福和研究组<sup>[36-37]</sup>在“深部资源探测核心装备研发项目”中开展了飞机载体磁场干扰补偿的工作,并获得了较好的效果;7)2016年,中科院遥感应应用研究所王婕等人<sup>[38]</sup>开展了无人机方面的航磁研究,主要有地

面测试以及试飞等研究内容。

目前航磁数据补偿工作主要是基于传统的航磁补偿模型实现,模型中假定数据间是理想同步没有延迟存在,然而往往使用的航磁补偿勘探设备由不同的模块(光泵频率测量模块、磁通门数据采集模块、导航定位模块、数据存储和补偿模块等)组成,各模块的工作时钟异步,实时数据难以做到严格同步,从而导致航磁数据在交互处理补偿时,出现因为信号通道间延迟导致的补偿偏差,最终影响航磁勘探数据质量。

本文针对航磁总场梯度系统中各磁力仪间以及磁力仪各信号通道间不同步导致的航磁补偿偏差问题,分析了航磁补偿系统光泵频率测量模块、磁通门数据采集模块之间的时间同步性对补偿效果的影响,最后提出了一种非线性航磁补偿模型。该补偿模型可以很好地对模块间信号通道延迟进行描述,并有效消除该同步误差造成的偏差,保证航磁补偿的有效性。

## 2 航磁补偿系统各传感器间的同步性分析

航磁梯度补偿通过两个光泵探头和三分量磁通门磁力仪连接到航磁补偿系统来实现。总场梯度的表达式如下:

$$G_B = \frac{B_a - B_b}{d} \quad (1)$$

式中: $B_a$ 和 $B_b$ 为两个光泵磁力仪探头测量的总场值, $d$ 为两个探头间的基线长度, $G_B$ 为对应的航磁勘探总场梯度。

在任一探头位置处,飞机的干扰由航磁总场模型表示:

$$\begin{aligned} H_d(t) = & c_1 \cos X(t) + c_2 \cos Y(t) + c_3 \cos Z(t) + \\ & H_e [c_4 \cos^2 X(t) + c_5 \cos X(t) \cos Y(t) + c_6 \cos^2 Y(t) + \\ & c_7 \cos X(t) \cos Z(t) + c_8 \cos Y(t) \cos Z(t) + c_9 \cos^2 Z(t)] + \\ & H_c [c_{10} \cos X(t) (\cos X(t))' + c_{11} \cos X(t) (\cos Y(t))' + \\ & c_{12} \cos X(t) (\cos Z(t))' + c_{13} \cos Y(t) (\cos X(t))' + \\ & c_{14} \cos Y(t) (\cos Y(t))' + c_{15} \cos Y(t) (\cos Z(t))' + \\ & c_{16} \cos Z(t) (\cos X(t))' + c_{17} \cos Z(t) (\cos Y(t))' + \\ & c_{18} \cos Z(t) (\cos Z(t))'] = \sum_{i=1}^{18} c_i A^i(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $c_i$ 为磁总场的磁补偿系数, $H_d(t)$ 为探头处的干扰总场, $A^i(t)$ 为航磁补偿模型中的特征元素。其矩阵表达式如下:

$$\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} \cos X(t) & \cos Y(t) & \cdots & \cos Z(t) & (\cos Z(t))' \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:地磁场与飞机平台的方向余弦可以由三轴磁通门的测量值计算得到。

$$\begin{cases} \cos X(t) = \frac{T(t)}{\sqrt{T(t)^2 + L(t)^2 + V(t)^2}} \\ \cos Y(t) = \frac{L(t)}{\sqrt{T(t)^2 + L(t)^2 + V(t)^2}} \\ \cos Z(t) = \frac{V(t)}{\sqrt{T(t)^2 + L(t)^2 + V(t)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T(t)$ 、 $L(t)$  和  $V(t)$  是磁通门输出的三轴分量。

因此,飞机平台磁干扰对总场梯度测量观测值的贡献可写为:

$$G_H(t) = \frac{H_{d2}(t) - H_{d1}(t)}{d} =$$

$$\frac{(\sum_{i=1}^{18} c_{i2} A^i(t) - \sum_{i=1}^{18} c_{i1} A^i(t))}{d} = \sum_{i=1}^{18} g_i A^i(t) \quad (5)$$

式中:  $G_H(t)$  为飞机干扰磁场的总场梯度,由基线两端的两个光泵磁力仪在时刻  $t$  的测量值的差分计算得到,  $g_i$  为梯度的补偿系数,  $A^i(t)$  为式(3)的第  $i$  个元素。式(5)中的补偿系数可以通过最小二乘算法进行求解。

传统的航磁补偿模型没有考虑数据间的延迟问题,但是实际中各个传感器之间是存在延时的,数据间的不同步将导致磁补偿时会出现补偿偏差,从而影响磁补偿的效果。从式(5)可见,对于航磁梯度系统,主要的数据记录延迟存在于  $H_{d1}$ 、 $H_{d2}$  和  $A^i(t)$  之间。可以分为以下3类:1)光泵和磁通门间的相对延迟;2)光泵和光泵间的相对延迟;3)磁通门各个通道间的相对延迟。

### 3 非线性航磁补偿算法及非线性求解方法

针对上文所提的3类补偿偏差来源,本节分析了航磁梯度系统中光泵频率测量模块、磁通门数据采集模块间的时间同步性对补偿效果的影响,并提出了一种考虑各传感器模块间时间延迟的非线性航磁补偿模型及对应的非线性最优化求解方式。

#### 3.1 各个传感器数据间的延迟

航磁梯度系统各传感器之间的数据流如图1所示。

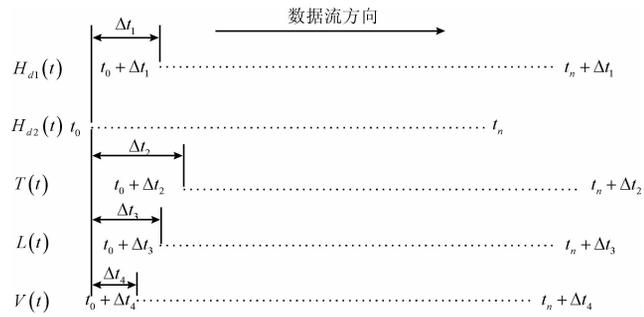


图1 各传感器输出延迟示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of the delay

其中  $\Delta t_i$  为不同传感器或不同通道间的延迟,理想无延时情况下,  $\Delta t_i = 0$ ; 对于实际的航磁梯度系统,  $\Delta t_i$  不为0。以第2个光泵磁力仪的输出  $H_{d2}(t_0)$  为时间参考基准,估计量  $\hat{H}_{d1}(t_0)$ 、 $\hat{T}(t_0)$ 、 $\hat{L}(t_0)$  和  $\hat{V}(t_0)$ ,可由  $t_0$  时刻附近的样本点,用线性预测的方式表示如下:

$$\begin{cases} \hat{V}(t_0) = \sum_{j=-l/2}^{l/2} m_j T(t_0 - \frac{j}{f_s}) \\ \hat{L}(t_0) = \sum_{j=-l/2}^{l/2} n_j L(t_0 - \frac{j}{f_s}) \\ \hat{V}(t_0) = \sum_{j=-l/2}^{l/2} p_j V(t_0 - \frac{j}{f_s}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f_s$  为系统采样率,  $m_j$ 、 $n_j$ 、 $p_j$  为线性预测的加权系数,  $l$  为序列作用范围,在理想无延迟的系统中,该加权系数满足如下表达式。

$$m_j = n_j = p_j = \delta(t - t_0) \quad (7)$$

在实际的硬件系统中,由于各个采集模块间的采用不同的时钟芯片,以及采集通道的先后顺序和各级电路造成的延时等不可控的因素,各个传感器之间的数据不可能做到完全同步,因此  $m_j$ 、 $n_j$  和  $p_j$  不能用式(7)中的冲击函数进行表示,而是系数待定的加权函数序列。

将式(6)代入式(4),可得方向余弦在时刻  $t_0$  的估计,如式(8)所示。

$$\begin{cases} \cos \hat{X}(t_0) = \sum_{j=-l/2}^{l/2} m_j T(t_0 - \frac{j}{f_s}) / \sqrt{(\sum_{j=-l/2}^{l/2} m_j T(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2 + (\sum_{j=-l/2}^{l/2} n_j L(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2 + (\sum_{j=-l/2}^{l/2} p_j V(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2} \\ \cos \hat{Y}(t_0) = \sum_{j=-l/2}^{l/2} n_j L(t_0 - \frac{j}{f_s}) / \sqrt{(\sum_{j=-l/2}^{l/2} m_j T(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2 + (\sum_{j=-l/2}^{l/2} n_j L(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2 + (\sum_{j=-l/2}^{l/2} p_j V(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2} \\ \cos \hat{Z}(t_0) = \sum_{j=-l/2}^{l/2} p_j V(t_0 - \frac{j}{f_s}) / \sqrt{(\sum_{j=-l/2}^{l/2} m_j T(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2 + (\sum_{j=-l/2}^{l/2} n_j L(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2 + (\sum_{j=-l/2}^{l/2} p_j V(t_0 - \frac{j}{f_s}))^2} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)结果带入式(3),可以获得航磁补偿模型的特征矩阵在  $t_0$  时刻的非线性估计量如式(9)所示。

$$f\left(\sum_{-l/(2f_s)}^{l/(2f_s)} t_j\right) = \begin{pmatrix} \cos\hat{X}(t_0) & \cos\hat{Y}(t_0) & \cdots & \cos\hat{Z}(t_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\hat{Z}(t_0) \end{pmatrix}' \quad (9)$$

用式(9)  $t_0$  时刻的特征矩阵,预测第2个光泵磁力计观测到的飞机平台磁干扰,表达式如式(10)所示。

$$\hat{H}_{d2}(t_0) = \sum_{i=1}^{18} c'_{i2} f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)}^{l/(2f_s)} t_j\right) \quad (10)$$

式中:  $f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)}^{l/(2f_s)} t_j\right)$  为式(9)中的第  $i$  个元素。

$$\hat{G}_H(t_0) = \frac{1}{d} (c'_{12} \cos\hat{X}(t_0) - c'_{11} \cos\hat{X}(t_0 - \Delta t_1)) + \frac{1}{d} (c'_{22} \cos\hat{Y}(t_0) - c'_{21} \cos\hat{Y}(t_0 - \Delta t_1)) + \cdots + \frac{1}{d} (c'_{182} \cos\hat{Z}(t_0) (\cos\hat{Z}(t_0))' - c'_{181} \cos\hat{Z}(t_0 - \Delta t_1) (\cos\hat{Z}(t_0 - \Delta t_1))') \quad (13)$$

将式(8)代入式(13)可得式(14)。

$$\hat{G}_H(t_0) = \frac{1}{d} \begin{pmatrix} c'_{12} \frac{\sum_{i=-l/2}^{l/2} m_i T\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)}{\sqrt{\left(\sum_{i=-l/2}^{l/2} m_i T\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=-l/2}^{l/2} n_i L\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=-l/2}^{l/2} p_i V\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)\right)^2}} \\ - c'_{11} \frac{\sum_{i=-l/2-\Delta t_1 \cdot f_s}^{l/2-\Delta t_1 \cdot f_s} m_i T\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)}{\sqrt{\left(\sum_{i=-l/2-\Delta t_1 \cdot f_s}^{l/2-\Delta t_1 \cdot f_s} m_i T\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=-l/2-\Delta t_1 \cdot f_s}^{l/2-\Delta t_1 \cdot f_s} n_i L\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)\right)^2 + \left(\sum_{i=-l/2-\Delta t_1 \cdot f_s}^{l/2-\Delta t_1 \cdot f_s} p_i V\left(t_0 - \frac{i}{f_s}\right)\right)^2}} \end{pmatrix} + \cdots \quad (14)$$

取  $(-l/2, l/2) \cup (-l/2 - \Delta t_1 \cdot f_s, l/2 - \Delta t_1 \cdot f_s)$  作为加权序列的作用范围,将式(8)中  $(-l/2, l/2)$  扩大到  $(-l/2 - \Delta t_1 \cdot f_s, l/2)$ ,并重新带入式(12),同时假设空间总场在  $\Delta t_1$  时间内基本保持不变,则最后化简得:

$$\hat{G}_H(t_0) = \sum_{i=1}^{18} g'_i f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)-\Delta t_1}^{l/(2f_s)} t_j\right) \quad (15)$$

最终的航磁补偿模型如式(15)所示,其中含有  $(3(l + f_s \cdot \Delta t_1) + 18)$  个未知参数。通过求解该未知系数,即可补偿存在时间同步误差的飞机磁干扰。

该模型为非线性形式,无法通过传统航磁补偿中的最小二乘方法求解,在此提出用 L-M (Levenberg-Marquardt) 方法求解该问题。

### 3.2 L-M 算法

在航磁补偿过程中,光泵磁力计测量得到飞机干扰磁场在  $t_0$  时刻的总场梯度为  $G_H(t_0)$ ,补偿后的剩余磁场的均方误差可以表示为:

$$G_{\text{error}}^2(t_0) = (G_H(t_0) - \hat{G}_H(t_0))^2 \quad (16)$$

由于式(15)中  $\hat{G}_H(t)$  为非线性函数,可以通过最优化的方法求解,令目标函数为所有样本点剩余磁场的加和,具体如下:

$$h = \frac{1}{2} \left( \sum_{j=1}^n (G_{\text{error}}^2(t_j)) \right) \quad (17)$$

用式(9)  $t_0$  时刻的特征矩阵,预测图1中第1个光泵磁力计观测到的飞机平台磁干扰,表达式如式(11)所示。

$$\hat{H}_{d1}(t_0) = \sum_{i=1}^{18} c'_{i1} f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)}^{l/(2f_s)} (t_j - \Delta t_1)\right) \quad (11)$$

将式(10)和(11)代入式(5),可以得到飞机对总场梯度的干扰可以写为:

$$\hat{G}_H(t_0) = \frac{\left( \sum_{i=1}^{18} c'_{i2} f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)}^{l/(2f_s)} t_j\right) - \sum_{i=1}^{18} c'_{i1} f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)}^{l/(2f_s)} (t_j - \Delta t_1)\right) \right)}{d} \quad (12)$$

将式(9)代入式(12),得式(13)。

L-M 算法适合求解非线性最优化问题,同时可以解决最优化过程中 Jacobian 矩阵不可逆的情形<sup>[39]</sup>。将式(15)代入式(16)后,再将  $G_{\text{error}}^2(t)$  的解析式代入式(17),可以得到最终的目标函数表达式如式(18)所示。

$$h = \frac{1}{2} \left( \sum_{j=1}^n \left( G_H(t_j) - \sum_{i=1}^{18} g'_i f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)-\Delta t_1}^{l/(2f_s)} t_j\right) \right)^2 \right) \quad (18)$$

为了获得最小的剩余磁场,需要最小化目标函数,即对应的优化问题如式(19)所示。

$$\min(h) \quad (19)$$

采用 L-M 算法来求解该问题。令:

$$F_j(\mathbf{x}) = \left( G_H(t_j) - \sum_{i=1}^{18} g'_i f^i\left(\sum_{-l/(2f_s)-\Delta t_1}^{l/(2f_s)} t_j\right) \right) \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{x}$  是由  $(3(l + f_s \cdot \Delta t_1) + 18)$  个待求解未知数组成的系数向量,令  $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}) \ F_2(\mathbf{x}) \ \cdots \ F_n(\mathbf{x}))^T$ ,可以计算得到对应的 Jacobian 矩阵如式(21)所示。

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \nabla F_1(\mathbf{x}) & \nabla F_2(\mathbf{x}) & \cdots & \nabla F_n(\mathbf{x}) \end{pmatrix}^T \quad (21)$$

通过迭代的方式获得上述问题的最优解,第  $k$  次的更新见式(22)所示。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - (\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}_k^T \mathbf{F}_k \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{J}_k = \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)$ ,  $\mathbf{F}_k = \mathbf{F}(\mathbf{x}_k)$ 。其中向量  $\mathbf{x}$  由4部分组成

成,分别为飞机磁干扰补偿系数  $g'$  以及3组通道间延时系数  $m, n, p$ 。可简记为  $(g' \ m \ n \ p)^T$ ,其中  $g'$  为  $g'_i$  组成的列向量,  $m$  为  $m_i$  组成的列向量,  $n$  为  $n_i$  组成的列向量,  $p$  为  $p_i$  组成的列向量。

为了使结果能最快地收敛到最优解上,首先利用L-S算法做预处理获得18项补偿系数,将其作为  $x$  初值中的参数  $g'$  部分,并任意设定其余参数,迭代运算至目标函数收敛。迭代计算得到的向量  $x$  即为非线性航磁补偿模

型中的补偿系数。

### 4 仿真结果分析

通过数值仿真来对上文所提非线性航磁补偿模型进行验证。仿真中首先给定航磁总场梯度系统的磁补偿系数,如表1所示。采用归一化的梯度计算方法,基线长度为1 m。

表1 磁补偿系数

Table 1 Coefficients of the aeromagnetic compensation for simulation

$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$
58.5	10.2	4.0	$1.1 \times 10^{-3}$	$-1.4 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$
$g_7$	$g_8$	$g_9$	$g_{10}$	$g_{11}$	$g_{12}$
$2.6 \times 10^{-4}$	$4.7 \times 10^{-5}$	$3.9 \times 10^{-4}$	0.02	$-3.4 \times 10^{-4}$	$-2.2 \times 10^{-5}$
$g_{13}$	$g_{14}$	$g_{15}$	$g_{16}$	$g_{17}$	$g_{18}$
$2.3 \times 10^{-4}$	0.019	$-1.4 \times 10^{-4}$	$-1.9 \times 10^{-5}$	$-2 \times 10^{-4}$	0.02

当各个传感器处于零延迟的时候,采用传统磁补偿算法的补偿结果是理想的。仿真生成的干扰磁场和理想零延迟的补偿结果如图2所示。

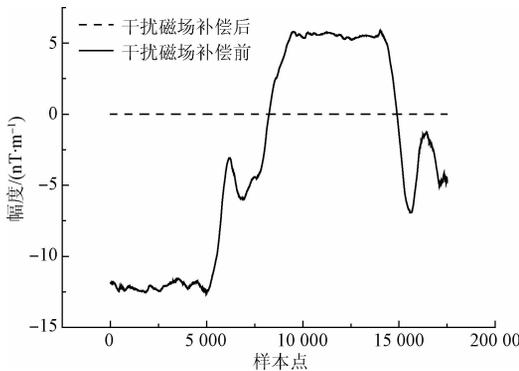


图2 干扰磁场和补偿后结果

Fig. 2 Interference magnetic fields and the compensation results

#### 4.1 数据间延迟导致的偏差干扰及补偿

对于真实系统,存在以下3种延迟:1)光泵和磁通门数据间相对延迟;2)光泵和光泵数据间相对延迟;3)磁通门各通道间数据相对延迟。下面将通过仿真来说明各类延时的影响,在数据质量评估中,采用航磁补偿常用的信号评估方法:信号的标准差和信号的峰峰值来衡量信号的补偿效果。

仿真中取延迟为10个样本间隔,图3所示为补偿前后的偏差曲线,表2所示为偏差的统计结果。为了便于视图,图3采用双纵轴显示,其中实线对应左纵轴,虚线

对应右纵轴,实线和虚线均在零附近。从图3和表2可见各传感器信号的不同步会使补偿结果产生较大的偏差,尤其是光泵和磁通门间的不同步,产生的偏差干扰是光泵间不同步的10倍左右。

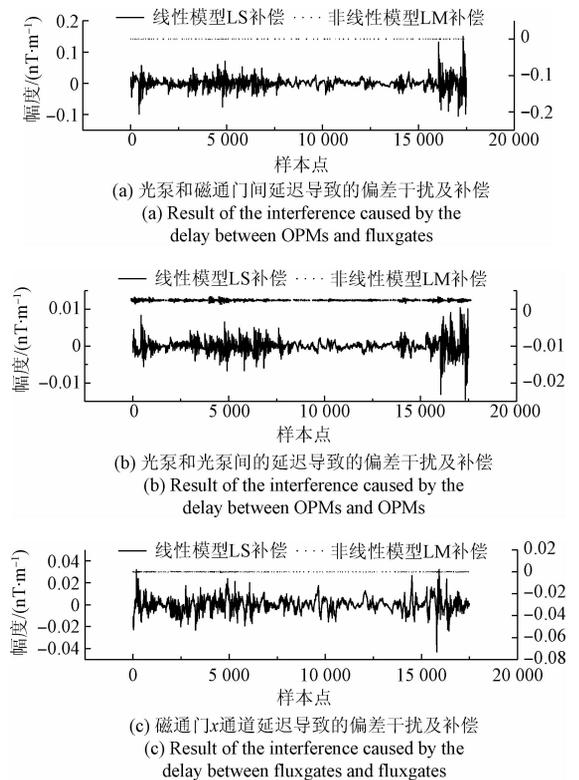


图3 延时导致的偏差干扰及补偿

Fig. 3 Interference magnetic fields caused by the delay and the compensation results

表2 信号延迟对补偿的影响

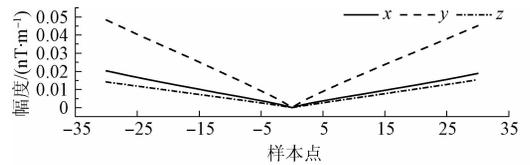
Table 2 Influence of the delay on the compensation results

参数	传统方法		本文方法	
	峰峰值/(nT·m <sup>-1</sup> )	标准差/(nT·m <sup>-1</sup> )	峰峰值/(nT·m <sup>-1</sup> )	标准差/(nT·m <sup>-1</sup> )
零延迟	6.16 × 10 <sup>-11</sup>	6.29 × 10 <sup>-12</sup>	-	-
光泵和磁通门间延迟	0.255 7	0.015 3	0.002 5	1.576 × 10 <sup>-4</sup>
光泵间延迟	0.025 0	0.001 6	0.002 5	1.577 × 10 <sup>-4</sup>
磁通门 x 通道	0.075 2	0.005 9	0.002 2	1.576 × 10 <sup>-4</sup>

从表2可知,光泵和磁通门间的偏差干扰的峰峰值从0.255 7 nT/m降低到0.002 5 nT/m,标准差从0.015 3 nT/m降低到1.576 × 10<sup>-4</sup> nT/m;光泵和光泵间的偏差干扰的峰峰值从0.025 nT/m降低到0.002 5 nT/m,标准差从0.001 6 nT/m降低到1.577 × 10<sup>-4</sup> nT/m;磁通门 x 通道的偏差干扰的峰峰值从0.075 2 nT/m降低到0.002 2 nT/m,标准差从0.005 9 nT/m降低到1.576 × 10<sup>-4</sup> nT/m。相比于传统方法补偿后有偏差的情况,文中所提的非线性补偿模型,通过L-M算法经过迭代计算后对补偿结果有较好的提升,有效的抑制了延迟导致的偏差干扰。

4.2 偏差的统计结果

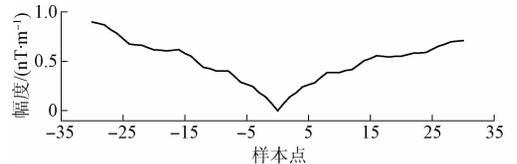
4.1 节针对延迟为10个样本点这一特例进行了补偿和分析,本节给出信号通道延时误差变化的统计结果,采用信号的标准差和峰峰值来评价数据的补偿质量。仿真中给出距离中心的偏差偏移量在-30~30的数据集的计算结果,图4和5所示为采用传统的补偿方法对信号进行补偿,其中图4为补偿后标准差的统计结果,图5为补偿后峰峰值的统计结果。



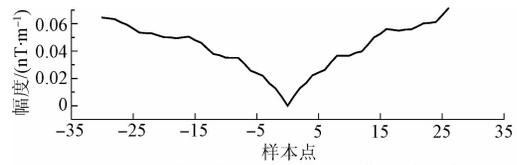
(c) 磁通门各通道间存在延迟的标准差统计结果  
(c) Statistical results of the delay between the fluxgates and the fluxgates

图4 传统方法补偿后标准差与信号延时误差样本点的关系

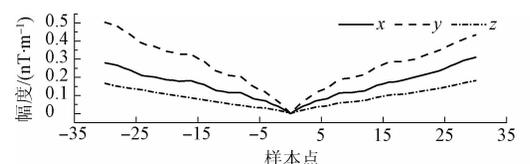
Fig. 4 Standard deviation of the compensation results by the conventional method



(a) 光泵和磁通门间存在延迟的峰峰值统计结果  
(a) Statistical results of the delay between the OPMs and the fluxgates



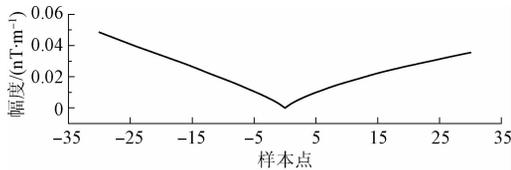
(b) 光泵和光泵间存在延迟的峰峰值统计结果  
(b) Statistical results of the delay between the OPMs and the OPMs



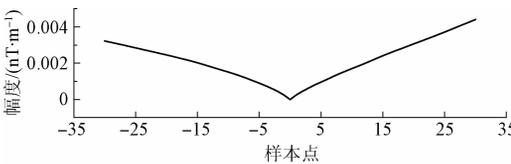
(c) 磁通门各通道间存在延迟的峰峰值统计结果  
(c) Statistical results of the delay between the fluxgates and the fluxgates

图5 传统方法补偿后信号峰峰值与信号延时误差样本点的关系

Fig. 5 Peak to peak values of the compensation results by the conventional method



(a) 光泵和磁通门间存在延迟的标准差统计结果  
(a) Statistical results of the delay between the OPMs and the fluxgates



(b) 光泵和光泵间存在延迟的标准差统计结果  
(b) Statistical results of the delay between the OPMs and the OPMs

由图4、5可知,数据间的延迟导致的偏差干扰随着偏差离中心点的距离呈正相关增长,不同数据间的偏差造成的影响也是不同的。可见光泵和磁通门间的不同步引入的补偿偏差最大,其标准差可达0.05 nT/m,峰峰值可达0.95 nT/m;其次是磁通门各个通道间的引入的补偿偏差,其标准差可达0.05 nT/m,峰峰值可达0.5 nT/m;较小的是光泵和光泵间的不同步引入的补偿偏差,其标准差可达0.003 5 nT/m,峰峰值可达0.065 nT/m。

采用本文方法对具有偏差的信号进行补偿处理,仿真结果如图6和7所示。仿真中对具有偏差的数据采用式(6)建模,其中 $l = 40$ ,能覆盖距离中心点的偏移量在 $-20 \sim 20$ 的数据集,采用L-M算法迭代补偿。

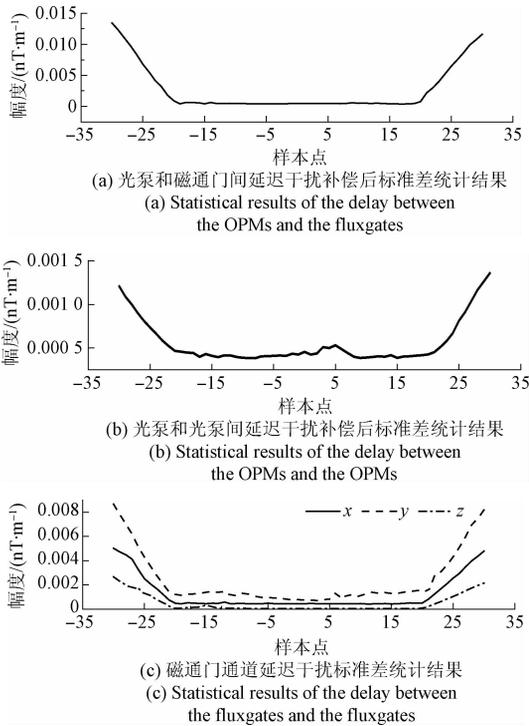


图6 本文方法补偿后的标准差

Fig. 6 Standard deviation of the compensation results by the proposed method

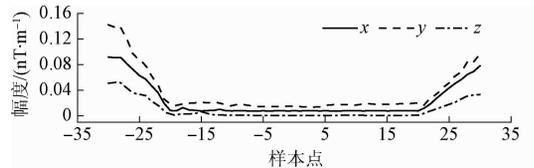
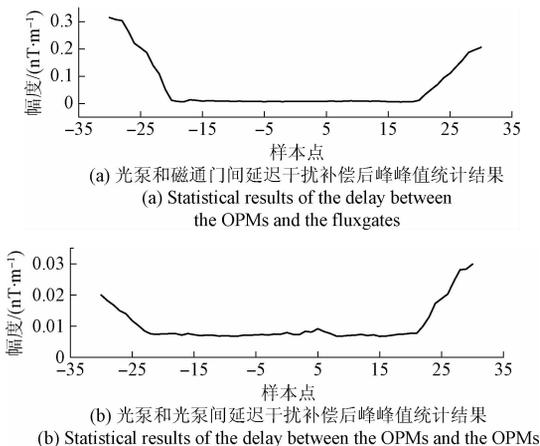


图7 文中方法补偿后的峰峰值

Fig. 7 Peak to peak values of the compensation results by the proposed method

图6所示为对偏差干扰补偿后的信号标准差,图7所示为对偏差干扰补偿后的信号峰峰值。补偿后标准差和峰峰值呈现较为一致的走势,曲线呈“碗口”形状,位于“碗口”底部的数据集获得了较好的补偿效果,位于“碗口”边沿的数据集补偿效果较差。由于 $l = 40$ ,经过文中所提方法处理,距离中心点的偏移量在 $-20 \sim 20$ 的数据集位于可精确补偿的范围内,位于 $[-30, -21] \cup [21, 30]$ 范围内的数据集由于没有经过式(6)的精确建模,因此无法获得准确的补偿,说明对于具有延迟的数据集必须同时经过式(6)的准确建模和式(20)的迭代求解,才能获得准确的补偿。

经过本文方法的补偿,具有延迟的数据集的标准差降低到 $10^{-4}$  nT/m量级,峰峰值降低到 $10^{-2}$  nT/m量级,满足高精度磁测要求。

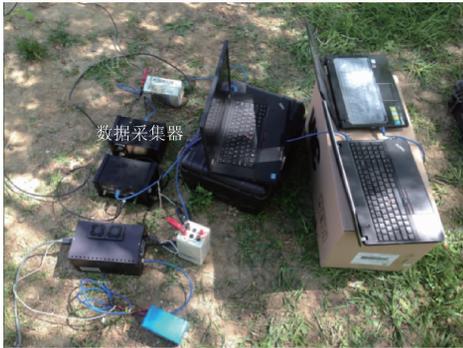
### 5 地面模拟飞行实验

本文采用地面模拟飞行实验的方式对文中方法进行验证,实验场景如图8所示。图8(a)为木质实验支架,支架上无磁直杆长度为1.5 m,在直杆前端固定两个CS-3 铯光泵磁力仪探头,探头中心间距为30 cm,后探头与磁通门的间距为60 cm,在支架尾部固定铁磁性材料用来模拟飞机的干扰磁场。图8(b)为数据记录设备,两个光泵磁力仪的数据通过两台相同的频率测量装置分别记录,磁通门的数据通过另一台采集站进行记录。实验中,通过改变支架上直杆的状态来模拟飞机飞行中的姿态变化,从而模拟飞机产生的干扰磁场。

在地面模拟飞行实验中,通过人工改变直杆状态来实现横滚、俯仰和偏航的机动动作,采集到的飞机干扰磁场的总场梯度如图9(a)所示;对模拟飞机干扰磁场采用传统的航磁补偿方法进行补偿后的结果如图9(b)所示;采用文中方法进行补偿后的结果见图9(c)所示。



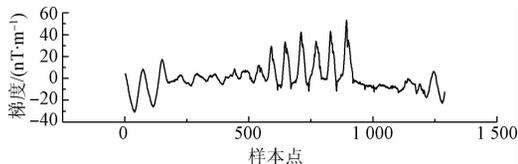
(a) 实验木质支架  
(a) Wooden shelf with OPMs, fluxgates and interference sources



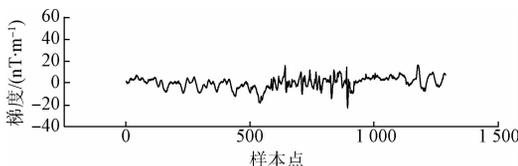
(b) 数据记录设备  
(b) Data recording systems

图8 实验场景

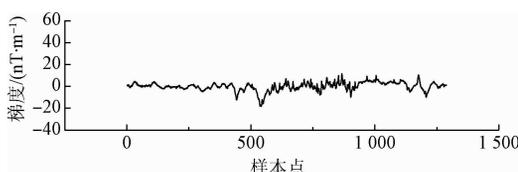
Fig. 8 Field experiments



(a) 飞机干扰磁场的总场梯度  
(a) Gradient interference magnetic fields of the simulated aircraft



(b) 传统方法补偿后结果  
(b) Compensation result of the conventional method



(c) 本文方法补偿后结果  
(c) Compensation result of the proposed method

图9 模拟飞机干扰磁场的总场梯度及不同方法补偿结果

Fig. 9 Gradient interference magnetic fields of the simulated aircraft and compensation results by different methods

对比图9(b)和(c),可见相比于传统方法,文中方法补偿后的结果曲线波动更小,走势更加平滑,尤其是0~500样本区间上,可以明显看出文中方法补偿飞机磁干扰后的剩余磁干扰比传统方法处理的效果更好,因此文中方法补偿结果优于传统方法的补偿结果。两种方法的补偿结果的定量比较如表3所示。

表3 不同方法的补偿结果对比

Table 3 Comparison results by the different methods

不同方法	标准差	峰峰值
未补偿信号	12.526 0	84.158 2
传统方法	5.314 7	35.107 7
文中方法	3.900 2	26.754 5

从表3中定量结果可见,文中方法补偿后的标准差要低于传统方法补偿后的标准差,可见文中方法相比传统补偿方法具有一定的优势。对比野外实验结果和仿真实验结果,可见仿真实验给出的飞机干扰磁场较小,野外实验测得的干扰磁场较大,该现象的原因主要是由于实验中背景电磁环境较为复杂,且处于近地表位置,所测得到的梯度磁场不单纯由飞机的干扰磁场组成,同时含有地表磁异常场以及附近机动车等目标的磁异常场,而航磁补偿模型仅针对飞机的干扰磁场进行补偿,无法有效地去除地表磁异常场和附近机动车等目标的磁异常场。因此即使在零延迟的理想状态下,这些磁异常场会依然存在无法被补偿,进而导致从补偿曲线上直观感受到的补偿效果提升不是非常明显。当设备搭载于真实飞机上进行高空航磁飞行时,地表磁异常场以及附近机动车等目标的磁异常场不会存在于航磁信号中,此时测得的干扰磁场的量级将显著降低,补偿曲线上的效果提升将会与仿真结果更加接近。在相同条件下的地面模拟飞行实验中,两种补偿方法对比结果表明文中方法可以对数据通道间延迟导致的偏差磁干扰进行有效补偿,从而具有更好的补偿效果。

## 6 结论

航磁补偿系统由多个传感器组成,不同类型传感器或同一传感器不同通道间数据是有延迟存在的,当采用传统的航磁补偿算法时,该延迟会导致待补偿数据集无法获得理想的补偿效果,产生一定程度的偏差干扰。本文针对航磁总场梯度系统中各磁力仪间以及磁力仪各信号通道间不同步导致的航磁补偿偏差问题,考虑航磁补偿系统各模块数据间延时产生机理,针对性的修正航磁补偿模型,实现补偿操作中交互量的准确估计,并针对性

的采用 L-M 迭代求解修正模型,实现了对系统延迟导致的偏差干扰的补偿。并通过仿真和地面模拟飞行实验,验证算法可以对具有延迟偏差的数据集实现较好的补偿,同时验证了算法的可靠性和普适性。研究工作可总结为以下几点:

1)不同传感器之间的数据不同步,对航磁补偿的结果有较大的影响,对于多探头组成的航磁总场梯度系统,误差源主要集中在以下3点:(1)光泵探头和磁通门数据间的延迟不同步;(2)光泵和光泵数据间的延迟不同步;(3)磁通门各个通道间数据的延迟不同步。

2)以数据的标准差和峰峰值作为评价标准时,在距离中心的偏移为-30~30个样本点的数据集内,磁通门和光泵间采样时间不同步导致的补偿偏差较大,该补偿偏差对总场梯度的影响最大值在0.05 nT/m,峰峰值0.95 nT/m;其次是磁通门各个通道间不同步引入的补偿偏差,其标准差可达0.05 nT/m,峰峰值可达0.5 nT/m;较小的是光泵和光泵间不同步引入的补偿偏差,其标准差可达0.0035 nT/m,峰峰值可达0.065 nT/m。通过本文方法补偿后,数据的标准差偏差量级可以降低到 $10^{-4}$  nT/m,峰峰值可以降低到 $10^{-2}$  nT/m,符合高精度航磁勘探的要求。

3)通过野外地面模拟飞行实验对算法的实际应用情况进行了验证分析,证明了算法在实际应用中的有效性。

## 参考文献

- [ 1 ] NABIGHIAN M N, GRAUCH V J S, HANSEN R O, et al. The historical development of the magnetic method in exploration[J]. *Geophysics*, 2005, 70(6):33ND-61ND.
- [ 2 ] HOOD P. History of aeromagnetic surveying in Canada[J]. *Leading Edge*, 2012, 26(11):1384-1392.
- [ 3 ] DOLL W E, GAMEY T J, BELL D T, et al. Historical development and performance of airborne magnetic and electromagnetic systems for mapping and detection of unexploded ordnance [J]. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2012, 17(1):1-17.
- [ 4 ] ZHANG B, GUO Z, QIAO Y. A simplified aeromagnetic compensation model for low magnetism UAV platform[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2011:3401-3404.
- [ 5 ] FORRESTER R, HUQ M S, AHMADI M, et al. Magnetic Signature Attenuation of an Unmanned Aircraft System for Aeromagnetic Survey [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4):1436-1446.
- [ 6 ] COWAN D R, BAIGENT M, COWAN S. Aeromagnetic gradiometers - A perspective [J]. *Exploration Geophysics*, 1995, 26(3):241-246.
- [ 7 ] HARDWICK C D. Aeromagnetic gradiometry in 1995[J]. *Exploration Geophysics*, 1996, 27(1):1-11.
- [ 8 ] NORIEGA G. Aeromagnetic compensation in gradiometry-Performance, model stability, and robustness[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1):117-121.
- [ 9 ] HARDWICK C D. Aeromagnetic gradiometry and compensation[C]. *South African Geophysical Association (SAGA)*, 1997: 63-65.
- [ 10 ] 刘欢,董浩斌,葛健,等.基于Overhauser效应的磁场梯度探测器[J].*仪器仪表学报*, 2015, 36(3):592-600.  
LIU H, DONG H B, GE J, et al. Magnetic field gradient detector based on the nuclear Overhauser effect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(3):592-600.
- [ 11 ] WILLIAMS P M. Aeromagnetic compensation using neural networks [J]. *Neural Computing and Applications*, 1993, 1(3):207-214.
- [ 12 ] TOLLES W E. Compensation of aircraft magnetic fields; US, US 2692970 A[P]. 1954.
- [ 13 ] TOLLES W E. Magnetic field compensation system[P]. US 2706801 A. 1955.
- [ 14 ] LELIAK P. Identification and evaluation of magnetic-field sources of magnetic airborne detector equipped aircraft[J]. *Ire Transactions on Aerospace & Navigational Electronics*, 1961, ANE-8(3):95-105.
- [ 15 ] HARDWICK C D. Important design considerations for inboard airborne magnetic gradiometers[J]. *Geophysics*, 1984, 49(11):2004-2018.
- [ 16 ] NELSON J B. Aeromagnetic noise during low-altitude flights over the scotian Shelf [R]. DRDC Atlantic TM, 2002, 89:1-40.
- [ 17 ] NELSON J B. Predicting in-flight MAD noise from ground measurements[R]. DREA TM, 2001, 112:1-26.
- [ 18 ] MARCOTTE D, NELSON B. Geomagnetic coherence trial #3[R]. DRDC Atlantic ECR, 2006, 266:1-24.
- [ 19 ] BICKEL S H. Error analysis of an algorithm for magnetic compensation of aircraft [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1979, AES-15(5):620-626.
- [ 20 ] BICKEL S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1979, AES-15(4):518-525.
- [ 21 ] NORIEGA G. Performance measures in aeromagnetic compensation [J]. *Leading Edge*, 2011, 30(10):1122-1127.
- [ 22 ] NORIEGA G. Model stability and robustness in aeromagnetic compensation [J]. *First Break*, 2013,

- 31(3):73-79.
- [23] 王景然, 卢立波, 刘浩, 等. 贝尔直升机航磁仪磁补偿结果分析[J]. 海洋测绘, 2013, 33(6):11-13.  
WANG J R, LU L B, LIU H, et al. The magnetic compensation analysis of the aeromagnetic instrument on the bell helicopter [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(6):11-13.
- [24] 庞学亮, 张宁, 林春生. 基于有限脉冲响应模型的飞机磁场补偿方法[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4):462-465.  
PANG X L, ZHANG N, LIN CH SH. Airplane magnetic compensation using finite impulse response model [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4):462-465.
- [25] 张宁, 赵建扬, 林春生, 等. 直升机平台背景磁干扰小信号模型求解与补偿[J]. 电子学报, 2017, 45(1):83-88.  
ZHANG N, ZHAO J Y, LIN CH SH, et al. Helicopter platform background magnetic interference small signal model solving and compensation [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(1):83-88.
- [26] 骆遥, 段树岭, 王金龙, 等. AGS-863 航磁全轴梯度勘查系统关键性指标测试[J]. 物探与化探, 2011, 35(5):620-625.  
LUO Y, DUAN SH L, WANG J L, et al. Key indicators testing for AGS-863 three axis airborne magnetic gradiometer [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(5):620-625.
- [27] 骆遥, 吴美平. 位场向下延拓的最小曲率方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1):240-251.  
LUO Y, WU M P. Minimum curvature method for downward continuation of potential field data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1):240-251.
- [28] 谢汝宽, 王平, 郭华, 等. 考虑航磁水平梯度变化的  $\Delta t$  网格化方法研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2):660-666.  
XIE R K, WANG P, GUO H, et al. Aeromagnetic total field gridding enhancement with horizontal gradient[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2):660-666.
- [29] 王林飞, 薛典军, 熊盛青, 等. 航磁软补偿质量评价方法及软件实现[J]. 物探与化探, 2013, 37(6):1027-1030.  
WANG L F, XUE D J, XIONG SH Q, et al. The method of quality assessment for digital magnetic compensation and software realization [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6):1027-1030.
- [30] 王林飞, 薛典军, 段树岭, 等. 航磁软补偿动作规范性评价[J]. 物探与化探, 2016, 40(2):365-369.  
WANG L F, XUE D J, DUAN SH L, et al. The normative evaluation of aeromagnetic compensation action[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(2):365-369.
- [31] 李季, 张琦, 潘孟春, 等. 载体干扰磁场补偿方法[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(3):7-11.  
LI J, ZHANG Q, PAN M CH, et al. The vehicle interferential magnetic field compensation method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3):7-11.
- [32] 李季, 潘孟春, 罗诗途, 等. 半参数模型在载体干扰磁场补偿中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9):2147-2152.  
LI J, PAN M CH, LUO SH T, et al. Study on the application of semi-parametric model in vehicle interferential magnetic field compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9):2147-2152.
- [33] DOU ZH J, HAN Q, NIU X M, et al. An aeromagnetic compensation coefficient-estimating method robust to geomagnetic gradient [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(5):611-615.
- [34] DOU ZH J, HAN Q, NIU X M, et al. An adaptive filter for aeromagnetic compensation based on wavelet multiresolution analysis [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(8):1-5.
- [35] ZHAO G Y, SHAO Y Q, HAN Q, et al. A novel aeromagnetic compensation method based on the improved recursive least-squares [C]. Advances in Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Berlin: Springer International Publishing, 2017: 171-178.
- [36] 张振宇, 程德福, 连明昌, 等. 氦光泵磁力仪信号检测控制回路的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(4):366-371.  
ZHANG ZH Y, CHENG D F, LIAN M CH, et al. Design of  $^4\text{He}$  optically pumped magnetometer's signal detection and control loop [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(4):366-371.
- [37] GUO C, MA M, CHENG D. A new solution of aircraft magnetic interference field based on errors-in-variables method [J]. Journal of Computational Intelligence & Electronic Systems, 2015, 4(1):70-73.
- [38] 王婕, 郭子祺, 刘建英. 固定翼无人机航磁探测系统的磁补偿模型分析[J]. 航空学报, 2016, 37(11):3435-3443.  
WANG J, GUO Z Q, LIU J Y. Analysis on magnetic compensation model of fixed-wing UAV aeromagnetic detection system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica

Sinica, 2016, 37(11):3435-3443.

- [39] 余秀美,童玲,胡学海. 基于MATLAB最大熵分布的最优解[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(增刊1): 98-103.

YU X M, TONG L, HU X H. Evaluation of uncertainty in measurement based on the maximum entropy method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2004, 18(Suppl. 1):98-103.

## 作者简介



吴佩霖,2012年于吉林大学获得学士学位,现为中国科学院大学博士研究生,主要研究方向为航磁系统设计及数据处理。

E-mail:wupeilin12@mails.ucas.ac.cn

**Wu Peilin** received his B. Sc. degree from Jilin University in 2012. Now he is a Ph. D.

candidate in Chinese Academy of Sciences, Beijing, China. His main research interests include the design of aeromagnetic system and aeromagnetic signal processing.



张群英(通讯作者),1999年于北京理工大学获得博士学位,现为中国科学院电子学研究所研究员,主要研究方向为新体制超宽带成像理论与方法、超宽带雷达信号处理与成像技术。

E-mail:qyzhang@mail.ie.ac.cn

**Zhang Qunying** (Corresponding author) received her Ph. D. degree in 1999 from Beijing Institute of Technology. Now she is a research fellow in Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include new system of UWB imaging theory and method, UWB radar signal processing and imaging technology.