

# 直升机平台背景磁干扰小信号模型求解与补偿

张 宁, 赵建扬, 林春生, 贾文抖

(海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

**摘 要:** 针对直升机外挂磁测吊舱探测平台, 分析了平台背景磁干扰产生机理, 得出平台背景磁干扰主要由飞机载体磁干扰、吊舱摆动引起的磁干扰和航迹波动引起的磁干扰三大部分组成, 建立了磁测吊舱轨迹计算模型和平台背景磁干扰小信号模型. 结合平台运动特点, 给出了小信号模型求解方法, 通过仿真计算, 对磁干扰小信号模型求解进行了验证. 分析结果表明, 采用小信号模型对直升机平台背景磁干扰进行求解和补偿是完全可以的, 适应性很好, 磁干扰补偿率可达90%.

**关键词:** 磁异常探测; 小信号模型; 磁测吊舱; 磁干扰补偿

**中图分类号:** TN965      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2017)01-0083-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.01.012

## Helicopter Platform Background Magnetic Interference Small Signal Model Solving and Compensation

ZHANG Ning, ZHAO Jian-yang, LIN Chun-sheng, JIA Wen-dou

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

**Abstract:** For helicopter external high precision magnetic survey pod detection platform, platform background magnetic interference mechanism is analyzed, and concluded that platform background magnetic disturbance consists of the aircraft carrier magnetic disturbance, fluctuating magnetic interference caused by pod swing and the magnetic disturbance caused by fluctuating track of platform. Magnetic survey pod trajectory calculation model and platform background magnetic interference small signal model are established. And combining with the characteristics of platform motion, small signal model solving method is given. Through simulation and calculation, the magnetic interference small signal model is verified, and the analysis results show that using the small signal model to solve and compensate the magnetic disturbance is completely possible, the adaptability is very good and magnetic disturbance compensation rate can reach more than 90%.

**Key words:** magnetic anomaly detection; small signal model; magnetic survey pod; magnetic disturbance compensation

### 1 引言

航空磁性探测平台主要有固定翼飞机和直升机两大平台, 固定翼飞机上的磁探设备一般安装在机尾处, 直升机是以吊舱的方式, 将磁探仪或者电磁线圈悬挂在舱外一定距离处. 国内外对固定翼飞机背景磁干扰建模与补偿进行了很多研究<sup>[1-7]</sup>, 其经典模型是由 Tolles W E 和 Lawson Q B 两位美国人提出的 Tolles-Lawson

方程; 嵇艳鞠和赵国泽等人<sup>[8,9]</sup>对航空电磁法进行了深入的研究, 取得了一定的成果; 但是国内外对直升机外挂装有磁探仪的吊舱系统平台的背景磁干扰建模及补偿方面的研究鲜见报道. 本文采取的测量方案是将磁场测量设备安装在悬挂于直升机底部中心附近的吊舱内, 要实现平台的高精度磁异常探测, 必须对其背景磁干扰进行补偿, 因此平台背景磁干扰建模与求解就成了一项关键技术.

收稿日期: 2015-07-29; 修回日期: 2016-01-29; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家重大科研装备研制项目 (No. ZDYZ2012-1); 湖北省自然科学基金 (No. 2015CFC865); 海军工程大学科研专项基金 (No. 435517J4086)

## 2 平台背景磁干扰产生机理

直升机上有电气设备、通电电缆、发动机机缸和旋翼轴承等很多铁磁性物体,它们在地磁场长期的磁化作用下,累积形成了一定的固有磁性,成为飞机背景磁干扰的剩余磁场部分;飞机在飞行过程中,机载铁磁性物体受到地磁场的瞬时磁化作用,会产生感应磁场;同时由于飞机的不平稳性机动飞行以及地磁梯度的变化,通过机载铁磁性物体的磁通会发生变化,产生一定的涡流磁场;另外,直升机的中部和尾部安装有旋翼,旋翼旋转时在其附近也会产生较大的磁干扰。

直升机磁测吊舱系统结构如图 1 所示,在飞行过程中,磁测吊舱受风阻等影响在平衡位置附近会发生摆动,导致测量点与飞机载体的相对位置发生变化,引起对飞机载体干扰磁场的观测结果发生变化,产生一定的磁干扰。

当吊舱的吊绳较长时,受风阻的影响,吊舱在空中的位置波动较大,同时直升机在空中的航迹也有一定程度的波动,这使得吊舱在大地坐标中的位置在航线附近波动。地磁场在空中的分布不均匀,沿纬度方向和高度方向有较大空间磁场梯度,因此测量吊舱的位置波动也会引起磁场测量结果的干扰。

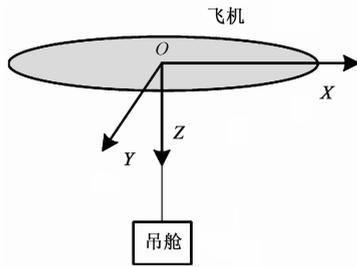


图1 测量系统安装示意图

## 3 平台背景磁干扰小信号模型

根据直升机平台特点,背景干扰磁场可分解为三个部分,第一部分为测量系统平稳悬吊时,飞机载体在测量系统吊舱处所产生的干扰磁场,它取决于飞机的磁性、航行地点与航向、飞行姿态和吊舱的悬吊位置等。第二部分磁场为吊舱受风阻等影响在平衡位置附近发生摆动时,由于测量点与飞机载体相对位置发生变化,引起了对飞机载体干扰磁场的观测结果发生变化,它与吊舱的位置偏移有关。第三部分磁场是当吊舱相对于大地坐标的位置发生波动时,由于地磁场在高度和水平方向存在空间梯度而引起的干扰噪声。

### 3.1 飞机载体磁干扰

飞机沿直航向作小幅度机动飞行时,地磁场三分量方向余弦可表示为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \cos(\theta_{i0} + \Delta\theta_i(t)) \\ &= \cos\theta_{i0}\cos\Delta\theta_i(t) - \sin\theta_{i0}\sin\Delta\theta_i(t) \\ &\approx \cos\theta_{i0} - \sin\theta_{i0} \cdot \Delta\theta_i(t) \\ &= U_i + v_i(t), \\ i &= 1 \sim 3 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $U_i = \cos\theta_{i0}$ 和 $v_i(t) = -\sin\theta_{i0} \cdot \Delta\theta_i(t)$ 分别为 $u_i(t)$ 的稳定量和变化量,当 $\Delta\theta_i(t) \leq 6^\circ$ 时,可保证 $u_i(t) = U_i + v_i(t)$ 的误差不大于0.5%。

飞机载体在测量吊舱处的磁场可用经典 Tolles-Lawson 模型来表示<sup>[4]</sup>

$$\Delta B_1 = \sum_{i=1}^3 P_i u_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} u_i u_j + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} u_j u_i' \quad (2)$$

在直航线附近,载体磁干扰引起的波动为

$$s_1(t) = \Delta B_1(U + v) - \Delta B_1(U) \quad (3)$$

联立式(1)、(2)和(3)可得

$$s_1(t) = \sum_{i=1}^3 (P_i + 2 \sum_{j=1}^3 a_{ij} U_j) \cdot v_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} U_j v_i' \quad (4)$$

为了使用方便,约定飞机坐标系如下,坐标 1 替换坐标 X、正向为机首方向,坐标 2 替换坐标 Y、正向为右侧机翼方向,坐标 3 替换坐标 Z、正向为垂直向下。由 $\sum_{i=1}^3 u_i^2 = 1$ ,可得 $\sum_{i=1}^3 U_i v_i = 0$ ,假设 $U_3 \neq 0$ (否则改变坐标次序,使 $U_3 \neq 0$ ),令 $v_3 = -(\sum_{j=1}^2 U_j v_j) / U_3$ ,则飞机载体磁干扰波动可进一步表示为

$$s_1(t) = W_1 v_1 + W_2 v_2 + W_3 v_1' + W_4 v_2' \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} W_i = P_i - P_3 \frac{U_i}{U_3} + 2 \sum_{j=1}^3 (a_{ij} - a_{3j}) \frac{U_j}{U_3} \cdot U_j \\ W_{i+2} = \sum_{j=1}^3 (b_{ij} - b_{3j}) \frac{U_j}{U_3} \cdot U_j \end{cases} \quad i=1,2 \quad (6)$$

### 3.2 吊舱摆动引起的磁干扰

#### 3.2.1 磁测吊舱轨迹计算

为了分析方便,建立坐标系如下:以吊舱在飞机上的悬挂点为原点 $O_1$ ,建立地磁坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ ,其中 $X_1$ 轴指北, $Y_1$ 轴指东, $Z_1$ 轴垂直向下, $OXYZ$ 为机载坐标系,如图 2 所示。

假设吊绳所受风阻较小,在吊舱拉力作用下,吊绳可近似看成直线,吊绳 $OB$ 长度为 $L$ ,倾角为 $I$ ,吊舱在水平面的投影 $OB_1$ 与磁北的夹角为 $\theta$ ,角度 $(\theta, I)$ 可以直接测量得到, $\theta_d$ 为测量点的磁偏角。

同时假设飞机沿直线航行,平均磁航向为 $\theta_0$ ,并在平衡位置附近作小角度 $(\theta_h, \theta_r, \theta_p)$ 机动,其中 $\theta_p$ 为俯仰角, $\theta_r$ 为横滚角, $\theta_h$ 为摇摆角(偏航角),地磁坐标系原

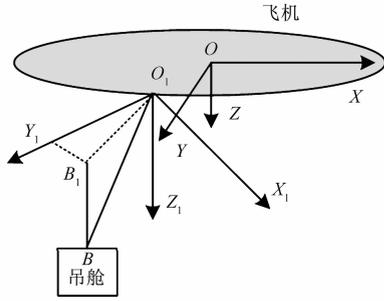


图2 平台坐标系结构图

点  $O_1$  在机载坐标系  $OXYZ$  中的位置坐标为  $(a, b, c)$ , 则测量吊舱在机载坐标系中的位置坐标可表示为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} L \cdot \cos I \cdot \cos(\theta + \theta_d - \theta_0) + a \\ L \cdot \cos I \cdot \sin(\theta + \theta_d - \theta_0) + b \\ L \cdot \sin I + c \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中  $A = A_h \cdot A_p \cdot A_r$  为飞机机动复合旋转变化矩阵, 可表示为

$$A = A_h \cdot A_p \cdot A_r = \begin{pmatrix} \cos\theta_h & \sin\theta_h & 0 \\ -\sin\theta_h & \cos\theta_h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_p & 0 & -\sin\theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_p & 0 & \cos\theta_p \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ 0 & -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{pmatrix} \quad (8)$$

实际应用中, 学习飞行阶段, 为了准确求解磁干扰模型参数, 要求飞行员在操纵飞机平稳飞行的基础上, 在每一个航向上依次进行固定时间段的俯仰机动、横滚机动和偏航机动飞行, 而且要求小机动的机动角幅度最大值在  $5^\circ$  左右; 进行目标探测时, 则要求飞行员操纵飞机, 尽量保持直航向平稳飞行. 因此, 无论是在学习飞行阶段还是目标探测阶段, 飞机在同一时刻基本上只有一种机动动作, 也就是说只有一种机动角不为零, 其它两个机动角可以看作零, 对于一个娴熟的飞行员, 这一点是可以做到的. 这样一来, 机载坐标系受飞机姿态影响在进行旋转变换时, 可以不考虑三种旋转变换的顺序, 因为三个旋转变换矩阵中, 在同一时刻只有一个矩阵起作用, 其余两个矩阵可以看作单位矩阵.

### 3.2.2 吊舱摆动磁干扰

根据平台背景磁干扰产生机理分析, 吊舱摆动时, 磁干扰在直航线附近的波动可近似表示为

$$s_2(t) = \frac{\partial(\Delta B)}{\partial x}x + \frac{\partial(\Delta B)}{\partial y}y + \frac{\partial(\Delta B)}{\partial z}z \approx W_5x + W_6y + W_7z \quad (9)$$

式中

$$W_5 = \frac{\partial(\Delta B)}{\partial x} \Big|_U = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial P_i}{\partial x} U_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial a_{ij}}{\partial x} U_i U_j \quad (10)$$

$$W_6 = \frac{\partial(\Delta B)}{\partial y} \Big|_U = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial P_i}{\partial y} U_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial a_{ij}}{\partial y} U_i U_j \quad (11)$$

$$W_7 = \frac{\partial(\Delta B)}{\partial z} \Big|_U = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial P_i}{\partial z} U_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial a_{ij}}{\partial z} U_i U_j \quad (12)$$

### 3.3 航迹波动引起的磁干扰

假设飞机北向速度分量为  $V_x$ , 可将  $V_x$  表达成一个均匀量  $V_{x0}$  和一个起伏量  $v_x$  的和

$$V_x = V_{x0} + v_x \quad (13)$$

从时刻  $t_0$  到  $t$ , 飞机的北向偏移距离为

$$X_N = \int_{t_0}^t (V_{x0} + v_x) dt = V_{x0}(t - t_0) + x(t) \quad (14)$$

式中  $V_{x0}(t - t_0)$  为趋势项, 代表匀速运动引起的北向偏移,  $x(t)$  为起伏量, 因速度起伏引起的, 实际计算中北向瞬时偏移  $X$  可以由惯性导航定位的纬度数据直接换算, 也可由地速与航向角数据通过积分得到.

飞机飞行高度可表达成

$$H(t) = H_0 + h(t) \quad (15)$$

$H_0$  为平均飞行高度,  $h(t)$  为飞行高度起伏. 飞行高度  $H(t)$  可以由导航系统得到.

分别对式 (13) 和 (15) 右边进行高通 FIR 滤波, 则两趋势项可以被完全滤除, 得到起伏量  $x(t)$  和  $h(t)$ . 假设地磁场沿纬度的空间梯度为  $k_x$ , 高度梯度为  $k_h$ , 根据地磁场的分布规律, 航迹波动引起的磁干扰主要由测量吊舱位置的纬度变化和高度变化所引起, 可表示为

$$s_3(t) = k_x x(t) + k_h h(t) \quad (16)$$

### 3.4 平台背景磁干扰

根据以上分析可知, 在直航线附近, 平台背景磁干扰波动可表示为

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_3(t) \quad (17)$$

联立式 (5)、(9) 和 (16) 可得

$$s(t) - k_x x_N - k_h h = W_1 v_1 + W_2 v_2 + W_3 v_1' + W_4 v_2' + W_5 x_1 + W_6 y_1 + W_7 z_1 \quad (18)$$

式中,  $k_x, k_h$  为地磁场的空间梯度, 可以预先求出.  $W_i, i = 1 \sim 7$  为模型航向参数, 是模型参数和航向上地磁场方向余弦  $U = (U_1, U_2, U_3)$  的线性组合.

### 4 磁干扰小信号模型求解

令  $D = (d_1, d_2, \dots, d_7) = (v_1, v_2, v_1', v_2', x_1, y_1, z_1)$ ,  $s_0(t) = s(t) - k_x x(t) - k_h h(t)$ , 将式 (18) 改写为

$$s_0(t) = W_1 d_1 + W_2 d_2 + W_3 d_3 + W_4 d_4 + W_5 d_5 + W_6 d_6 + W_7 d_7 \quad (19)$$

为了求解所有模型参数, 让飞机在 8 个直航向上作小幅度机动飞行, 在每一航向  $U^k = (U_{1k}, U_{2k}, U_{3k})$ ,  $k = 1 \sim 8$  上, 同步连续采集  $s_0, v_1, v_2, v_1', v_2', x, y, z$  样本数据, 并对式 (19) 两端作内积运算, 得到以下方程

$$\begin{cases} r_{11}W_1 + r_{12}W_2 + r_{13}W_3 + r_{14}W_4 + r_{15}W_5 + r_{16}W_6 + r_{17}W_7 = r_{10} \\ r_{21}W_1 + r_{22}W_2 + r_{23}W_3 + r_{24}W_4 + r_{25}W_5 + r_{26}W_6 + r_{27}W_7 = r_{20} \\ r_{31}W_1 + r_{32}W_2 + r_{33}W_3 + r_{34}W_4 + r_{35}W_5 + r_{36}W_6 + r_{37}W_7 = r_{30} \\ r_{41}W_1 + r_{42}W_2 + r_{43}W_3 + r_{44}W_4 + r_{45}W_5 + r_{46}W_6 + r_{47}W_7 = r_{40} \\ r_{51}W_1 + r_{52}W_2 + r_{53}W_3 + r_{54}W_4 + r_{55}W_5 + r_{56}W_6 + r_{57}W_7 = r_{50} \\ r_{61}W_1 + r_{62}W_2 + r_{63}W_3 + r_{64}W_4 + r_{65}W_5 + r_{66}W_6 + r_{67}W_7 = r_{60} \\ r_{71}W_1 + r_{72}W_2 + r_{73}W_3 + r_{74}W_4 + r_{75}W_5 + r_{76}W_6 + r_{77}W_7 = r_{70} \end{cases} \quad (20)$$

式中 $(r_{ij} = \langle d_i, d_j \rangle)$ ,  $(r_{i0} = \langle d_i, s_0 \rangle)$ , 在每一航向  $U^k = (U_{1k}, U_{2k}, U_{3k})$ ,  $k=1 \sim 8$  上, 求解方程(20), 可以得到航向系数  $W_{ik}$ ,  $i=1 \sim 7, k=1 \sim 8$ . 利用航向系数  $W_{ik}$ ,  $i=1 \sim 2, k=1 \sim 8$ , 根据式(10)中第一式, 可以解出剩磁参数 $(P_1, P_2, P_3)$ 和感磁参数 $(a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23})$ . 利用航向系数  $W_{ik}$ ,  $i=3 \sim 4, k=1 \sim 8$ , 可以解出涡流磁场参数 $(b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32})$ . 利用航向系数  $W_{5k}$ ,  $k=1 \sim 8$ , 根据式(10)可以解出剩磁参数沿  $x$  方向变化率 $(\frac{\partial P_1}{\partial x}, \frac{\partial P_2}{\partial x}, \frac{\partial P_3}{\partial x})$ 和感磁参数沿  $x$  方向变化率 $(\frac{\partial a_{11}}{\partial x}, \frac{\partial a_{12}}{\partial x}, \frac{\partial a_{13}}{\partial x}, \frac{\partial a_{22}}{\partial x}, \frac{\partial a_{23}}{\partial x})$ . 利用航向系数  $W_{6k}$ ,  $k=1 \sim 8$ , 根据式(11)可以解出剩磁参数沿  $y$  方向变化率 $(\frac{\partial P_1}{\partial y}, \frac{\partial P_2}{\partial y}, \frac{\partial P_3}{\partial y})$ 和感磁参数沿  $y$  方向变化率 $(\frac{\partial a_{11}}{\partial y}, \frac{\partial a_{12}}{\partial y}, \frac{\partial a_{13}}{\partial y}, \frac{\partial a_{22}}{\partial y}, \frac{\partial a_{23}}{\partial y})$ . 利用航向系数  $W_{7k}$ ,  $k=1 \sim 8$ , 根据式(12)可以解出剩磁参数沿  $z$  方向变化率 $(\frac{\partial P_1}{\partial z}, \frac{\partial P_2}{\partial z}, \frac{\partial P_3}{\partial z})$ 和感磁参数沿  $z$  方向变化率 $(\frac{\partial a_{11}}{\partial z}, \frac{\partial a_{12}}{\partial z}, \frac{\partial a_{13}}{\partial z}, \frac{\partial a_{22}}{\partial z}, \frac{\partial a_{23}}{\partial z})$ . 求解出模型系数后, 根据模型(17)可得到平台背景磁干扰, 进而可对平台背景磁干扰进行补偿.

## 5 仿真计算与补偿

根据直升机背景磁场磁偶极子阵列模型, 结合平台在飞行过程中的飞机姿态变化和吊舱轨迹变化规律, 设定仿真条件如下: 地磁场强度初始大小  $B_G = 55000\text{nT}$ , 地磁倾角为  $\varphi_g = 45^\circ$ , 地磁北纬梯度为  $5.91\text{nT/km}$ , 高度梯度为  $-25.91\text{nT/km}$ ; 直升机直航向飞行速度为  $100\text{m/s}$ , 飞机机动主频  $f_0 = 0.1\text{Hz}$ , 飞机三种机动角对应机动主频的最大幅度均设为  $5^\circ$ ; 数据采样频率  $f_s = 20\text{Hz}$ , 吊绳长度  $L = 40$ , 吊舱平衡位置处倾角为  $I = 70^\circ$ , 吊舱倾角和吊舱偏角对应吊舱摆动主频的最大摆动幅度都为  $5^\circ$ ; 分别仿真生成平均磁航向依次为  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$  等八个航向和  $30^\circ, 120^\circ, 210^\circ, 300^\circ, 70^\circ, 160^\circ, 250^\circ, 340^\circ$  等八个

航向上的两组平台背景磁干扰数据, 如图3和图4所示, 具体仿真过程, 可参考文献[11, 12].

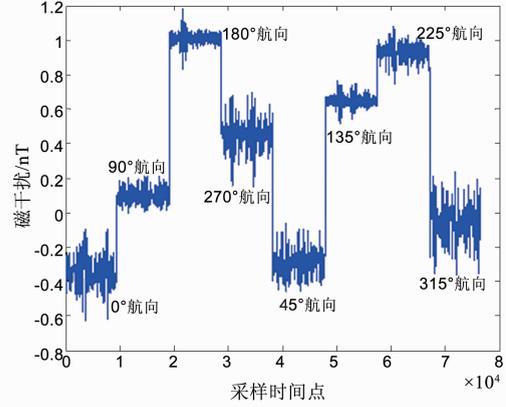


图3 平台背景磁干扰数据(一)

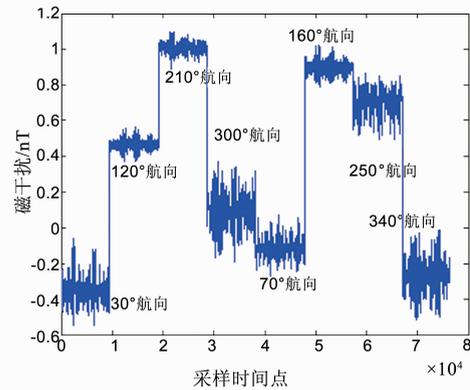


图4 平台背景磁干扰数据(二)

利用第一组平台背景磁干扰数据, 结合模型磁干扰小信号模型, 分别在每个航向上求解出航向系数  $W_{ik}$ ,  $i=1 \sim 7, k=1 \sim 8$ , 如表1所示.

记

$$sd_1 = [P_1, P_2, P_3, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23}]'$$

$$sd_2 = [b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32}]'$$

$$sd_3 = \left[ \frac{\partial P_1}{\partial x}, \frac{\partial P_2}{\partial x}, \frac{\partial P_3}{\partial x}, \frac{\partial a_{11}}{\partial x}, \frac{\partial a_{12}}{\partial x}, \frac{\partial a_{13}}{\partial x}, \frac{\partial a_{22}}{\partial x}, \frac{\partial a_{23}}{\partial x} \right],$$

$$sd_4 = \left[ \frac{\partial P_1}{\partial y}, \frac{\partial P_2}{\partial y}, \frac{\partial P_3}{\partial y}, \frac{\partial a_{11}}{\partial y}, \frac{\partial a_{12}}{\partial y}, \frac{\partial a_{13}}{\partial y}, \frac{\partial a_{22}}{\partial y}, \frac{\partial a_{23}}{\partial y} \right],$$

$$sd_5 = \left[ \frac{\partial P_1}{\partial z}, \frac{\partial P_2}{\partial z}, \frac{\partial P_3}{\partial z}, \frac{\partial a_{11}}{\partial z}, \frac{\partial a_{12}}{\partial z}, \frac{\partial a_{13}}{\partial z}, \frac{\partial a_{22}}{\partial z}, \frac{\partial a_{23}}{\partial z} \right],$$

由求解的航向系数  $W_{ik}$ , 求解得到磁干扰小信号模型参数, 如表2所示.

通过求得的模型参数  $sd_i$ , 根据式(17), 反求出平台背景磁干扰, 并进行补偿, 结果如图5所示, 图中蓝色数据是补偿前对平台背景磁干扰数据(一)进行高通滤波的结果, 红色曲线是补偿后的结果, 可以看出, 补

表 1 八航向系数求解结果

$W_1(0^\circ)$	$W_2(90^\circ)$	$W_3(180^\circ)$	$W_4(270^\circ)$	$W_5(45^\circ)$	$W_6(135^\circ)$	$W_7(225^\circ)$	$W_8(315^\circ)$
-1.952167	-0.378325	1.399950	-0.792076	-1.671889	0.555608	0.833880	-1.706671
-0.190287	0.019305	-0.242365	0.788414	-1.060074	-1.839511	1.641917	0.663661
-0.368228	-0.136187	0.354592	-0.174063	-0.329385	0.167210	0.168699	-0.382628
-0.040168	-0.413536	-0.018597	0.400079	-0.234557	-0.410043	0.346878	0.201781
0.163720	0.071511	-0.047671	0.084011	0.130648	-0.023196	0.003972	0.161214
0.015470	0.031876	0.041661	-0.056525	0.085428	0.150306	-0.091808	-0.050422
-0.003914	-0.021036	0.113224	0.104410	0.040567	0.172589	0.046215	-0.012438

表 2 磁干扰小信号模型参数求解结果

$sd_1$	$sd_2$	$sd_3$	$sd_4$	$sd_5$
-0.166998	-0.517523	0.050836	-0.005044	-0.029694
0.166771	0.026329	-0.006284	0.041915	0.000164
0.698332	-0.232820	0.076963	0.017817	0.062171
-0.694780	-0.000029	0.007482	0.047173	0.034944
0.013530	-0.585956	-0.001699	-0.053127	-0.036681
-0.419975	-0.047407	0.071893	-0.007134	-0.041994
-0.292810	-0.218168	0.046939	-0.034575	0.009017
-0.274569	-0.035362	-0.008887	0.059277	0.000232

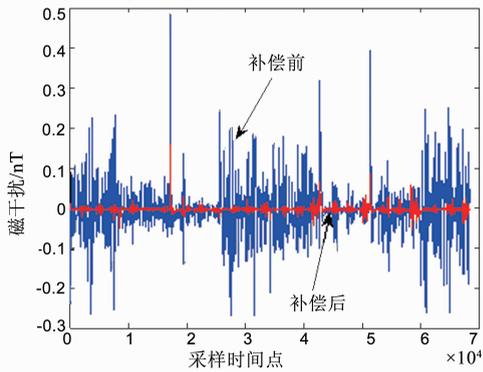


图5 磁干扰数据一的补偿结果

偿效果非常明显,为了更清晰的看出补偿效果,将前两个航向( $0^\circ$ 和 $90^\circ$ )的补偿结果单独作图,如图 6 所示。

利用数据(一)求解的模型参数  $sd_i$ ,对第二组八航向磁干扰进行补偿,结果如图 7 所示,同样将前两个航向( $30^\circ$ 和 $120^\circ$ )的补偿结果单独作图,如图 8 所示,从图 7

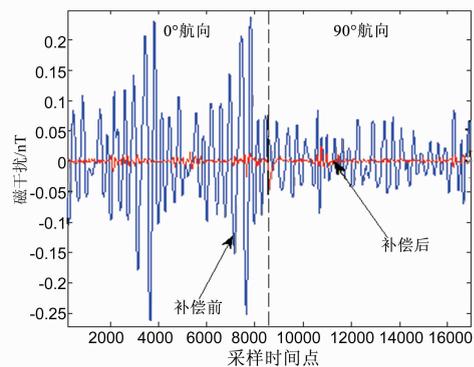


图6 磁干扰数据一前两航向补偿结果

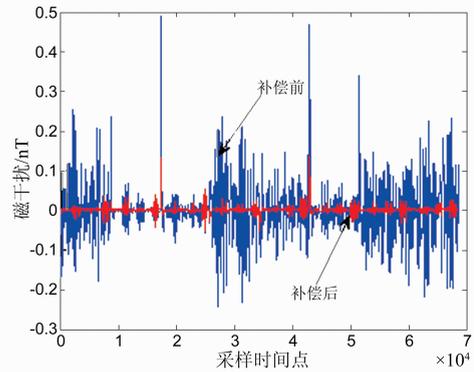


图7 磁干扰数据二的补偿结果

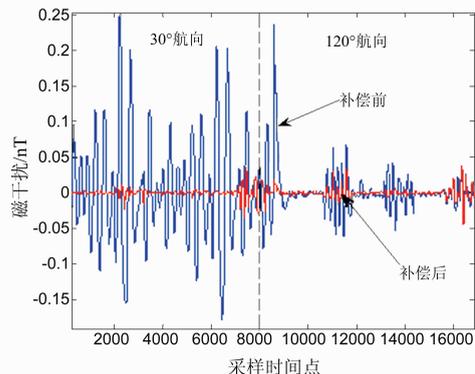


图8 磁干扰数据二前两航向补偿结果

和图 8 可以看出,利用第一组数据求解的模型参数,对第二组磁干扰数据进行补偿,效果也是非常明显的,补偿率可达 90% 以上,充分说明了平台背景磁干扰小信号模型建立的正确性和适应性以及模型求解的精确性。

## 6 结束语

针对直升机悬挂磁测吊舱平台运动特点,分析了平台背景磁干扰产生机理,建立了磁测吊舱轨迹计算模型和平台背景磁干扰小信号模型,给出了小信号模型求解方法,通过仿真计算与补偿,表明平台背景磁干扰小信号模型建立和求解是正确的,而且在同一地点,只需利用一次八航向学习飞行的数据求解出模型参数,就可以对平台背景磁干扰进行高精度补偿,对实现

直升机平台磁异常高精度探测具有重要意义.

#### 参考文献

- [1] 张昌达. 航空磁力梯度张量测量—航空磁测技术的最新进展[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(5): 354 – 361.  
Zhang C D. Airborne tensor magnetic gradiometric—the latest progress of airborne magnetometric technology [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(5): 354 – 361. (in Chinese)
- [2] 林春生, 周建军, 杨振宇. 一种基于总强度监测的三轴线圈磁场发生器精确校准方法[J]. 海军工程大学学报, 2013, 10(5): 1 – 5.  
Lin C S, Zhou J J, Yang Z Y. An accurate method of calibrating three-axis-coil magnetic field generator by monitoring magnetic field intensity [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 10(5): 1 – 5.
- [3] Tolles W E. Compensation of induced magnetic fields in mad equipped aircraft [A]. Proceedings of Airborne Instruments Lab Inc [C]. OSRD, 1943. 1 – 5.
- [4] Tolles W E, Lawson J D. Magnetic compensation of MAD equipped aircraft [A]. Proceedings of Airborne Instruments Lab Inc [C]. Mineola, NY, 1950. 1 – 6.
- [5] Arie S, Boris G, Nizan S, et al. Magnetic anomaly detection using high-order crossing method [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1095 – 1102.
- [6] Zhou J J, Lin C S, Fu K. A method for real-time compensation of moving ferromagnet's magnetic moment [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 325: 130 – 134.
- [7] Zhou J J, Lin C S, Yu J. An improved method for compensation of magnetic disturbance caused by ferromagnet in measuring position [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 354: 58 – 64.
- [8] 嵇艳鞠, 林君, 关珊珊, 等. 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 Y J, Lin J, Guan S S, et al. Theoretical study of concentric loop coils attitude correction in helicopter-borne TEM [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 171 – 176. (in Chinese)
- [9] 赵国泽, 陈小斌, 汤吉. 中国地球电磁法新进展和发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1171 – 1180.  
Zhao G Z, Chen X B, Tang J. Advanced geo-electromagnetic methods in China [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1171 – 1180. (in Chinese)
- [10] Bickel S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers [J]. IEEE Transactions on AES, 1979, 15(4): 201 – 223.
- [11] Zhao Jianyang, Lin Chunsheng. Research on the modeling of helicopter background magnetic field based on the magnetic dipole array [A]. Proceedings of International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference [C]. Xi'an, 2015, vol 12: 454 – 456.
- [12] Zhao Jianyang, Lin Chunsheng. Study on simulation of aircraft background magnetic field [A]. Proceedings of International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology [C]. Guilin, 2014, vols 559 – 601: 1257 – 1260.

#### 作者简介



张 宁 男, 1981 年 3 月出生, 山东即墨人. 2009 年获得海军工程大学武器系统与运用工程专业博士学位, 留校工作, 主要从事军用目标磁场特性及其信息处理技术研究.  
E-mail: 18602710800@163.com