

引用格式:李婷,王仕成,张金生. 磁场测量误差补偿技术综述[J]. 电光与控制,2018,25(6):66-71. LI T, WANG S C, ZHANG J S. A review on geomagnetic measurement error compensation technologies[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):66-71.

## 磁场测量误差补偿技术综述

李 婷, 王仕成, 张金生  
(火箭军工程大学,西安 710025)

**摘要:** 磁场测量误差补偿技术是地磁导航的关键技术之一。磁场测量误差补偿问题本质是磁力仪的标定与载体干扰磁场补偿的综合问题。对磁测误差补偿问题及其方法的研究进展进行了综述,介绍了磁测误差补偿技术的国内外研究现状,分析了磁测误差补偿模型及补偿方法,指出了制约该领域发展的关键技术和存在的问题,提出了磁测误差补偿技术的发展方向。

**关键词:** 地磁导航; 磁场测量; 误差补偿; 参数估计; 非线性优化

**中图分类号:** V249.32 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.06.015

## A Review on Geomagnetic Measurement Error Compensation Technologies

LI Ting, WANG Shi-cheng, ZHANG Jin-sheng  
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Geomagnetic measurement error compensation technology is one of the key technologies in geomagnetic navigation, which is essentially a comprehensive issue of the calibration of magnetometer and the compensation of vehicle interferential magnetic field. The geomagnetic measurement error compensation and the research progress of its approaches are reviewed in this paper. The research status of this technology at home and abroad is illustrated, and the compensation models and compensation methods are analyzed. The key technologies and existing problems which restrain its development are pointed out, and its developing trend is proposed.

**Key words:** geomagnetic navigation; geomagnetic measurement; error compensation; parameter estimation; nonlinear optimization

### 0 引言

作为一种自主导航方式,地磁导航具有全天候、抗干扰能力强的特点。其基本原理是将磁传感器安装于载体上,载体运动时实时测量磁场数据,同时与载体计算机中的地磁基准图进行比对和匹配,以确定飞行载体的位置<sup>[1]</sup>。高精度的磁场测量是地磁导航应用的关键因素之一。

文献[2]指出测磁仪器的性能是制约地磁导航发展的关键技术之一,要重点加强磁敏感元件产生的磁干扰特性研究、干扰磁场补偿和消除技术研究,从而保

证磁场测量精度不受外界因素的影响,为高精度导航解算奠定基础。

磁场测量误差来自两个方面:一是磁力仪误差,包括零偏误差、敏感度误差和三轴不正交误差;二是周围环境的误差,包括载体中硬磁材料、软磁材料以及电子设备等带来的硬磁误差、软磁误差以及难以建模的随机干扰场误差。因此,为了提高测量精度,有必要从磁力仪误差标定和载体干扰补偿两个方面共同努力。

### 1 磁场测量误差补偿问题的研究现状

#### 1.1 航磁测量补偿研究现状

为了减少飞机载体对磁力仪测量的干扰,国内外学者及企业公司在航磁补偿领域掀起了一阵热潮<sup>[3]</sup>。

美国学者 TOLLES<sup>[4]</sup>提出了 Tolles-Lawson 方程,分析了载体干扰磁场,包括恒定磁场、感应磁场和涡流磁场。20世纪60年代,加拿大蒙特利尔 CAE 公司推出了

收稿日期:2017-05-26

修回日期:2017-07-25

基金项目:国家自然科学基金(11602296);中国博士后科学基金(2014 T70974)

作者简介:李 婷(1989—),女,河南濮阳人,博士生,研究方向为地磁导航。

半自动补偿器,对上述3种磁场进行补偿,耗时约30~45 min;1970年,美国学者PASSIER提出了一种新形式的补偿系统,可以补偿100 nT的干扰磁场,精度达0.1 nT,可应用于飞机PR-141;1980年,苏联学者VAT-SURO提出了基于Tolles-Lawson方程的磁补偿方法,并在AN-2飞机上进行了试验。2006年,安大略公司在AARC500自动补偿仪的基础上研发了同时拥有数据采集与补偿功能的DAARC500系统,可提供最终精确的磁场数据,功能强大,抗干扰能力强,且能够以低成本获取高质量数据;加拿大Pico Envirotec公司研发了能够在飞行结束后获得磁补偿系数的软件包PEIcomp,实现了在磁测过程中对机身的补偿;加拿大Scott Hogg & Associates地球物理软件公司研发了一套航空磁测补偿软件CMAG4,可以同步处理4个通道磁力仪的输入,达到离线补偿的效果,并且已经成功应用于多种固定翼和直升机的测量系统。

国内的航磁补偿工作始于20世纪60年代。402型磁探仪装载于AN-2飞机时出现了明显的转向差,引起了学者们的广泛关注并开始对该误差进行探究。1965年,卓松年利用泊松方程对飞机磁干扰场的数学表达式进行求解,奠定了国内磁补偿的理论基础。1974年,在研制出九项电子补偿器后,某些研究机构联合研制出CBK-1型电子补偿器;1977年某部门成功研制出了DBQ-1型九项电子补偿器,这两种电子补偿器均属于稳态补偿。1982年,某部门成功研制了涡流磁场补偿器,与DBQ-1共同对飞机上的固定磁场、感应磁场和涡流磁场进行补偿,精度可达2 nT,该方法一直沿用至今。

## 1.2 磁场测量误差常用补偿措施

### 1.2.1 硬件补偿

硬件补偿通常采用硬件电路产生新的磁场来抵消干扰磁场,或将载体置于零磁空间中,或利用数字低通滤波器滤除噪声和干扰信号。硬件补偿方法不能解决动态环境下的磁测误差补偿。

### 1.2.2 软件补偿

软件补偿又称软补偿,包括利用归一化算法消除随机噪声,对包括磁力仪标定在内的环境磁测误差建模,完成对磁力仪校正和载体软磁干扰、硬磁干扰等综合干扰补偿,而且能够实现动态环境下的磁场补偿,提高动态补偿精度。

## 2 磁测误差补偿模型

误差建模过程中,存在着未被充分考虑的干扰项,比如由于安装工艺的限制导致的安装误差角,载体运

动引起的涡流干扰等。由磁场的叠加原理可知,若某些误差的施加性质等同于误差模型中已经存在的误差参量,那么未被考虑的误差项也会通过模型得到校正,三轴磁力仪误差与载体磁场干扰以相同的形式作用于磁力仪的输出,国外学者将磁力仪的标定与测量误差的补偿过程统一建模为磁力仪标定问题。

### 2.1 十二常数补偿模型

十二常数补偿模型是针对捷联磁力仪的磁罗差理论建立的磁测补偿模型<sup>[5]</sup>,即

$$\begin{bmatrix} F'_{mx} \\ F'_{my} \\ F'_{mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F'_x \\ F'_y \\ F'_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} F'_{mx} \\ F'_{my} \\ F'_{mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{mx} - F_{hx} \\ F_{my} - F_{hy} \\ F_{mz} - F_{hz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} F'_x \\ F'_y \\ F'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $F'_{mx}$ 、 $F'_{my}$ 和 $F'_{mz}$ 分别表示校正后的三轴磁力仪输出值; $F_{mx}$ 、 $F_{my}$ 和 $F_{mz}$ 分别表示磁力仪的测量输出值; $F_{hx}$ 、 $F_{hy}$ 和 $F_{hz}$ 表示固有磁场分量,称为固有磁场补偿系数;矩阵中的 $f$ 系数表示与软磁材料有关的常数,称为感应磁场补偿系数;地理坐标系下地磁矢量 $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 在体坐标系下的分量为 $F'_x$ 、 $F'_y$ 和 $F'_z$ ; $\varphi$ 、 $\gamma$ 和 $\theta$ 是地理坐标系下载体的姿态信息,分别为方位角、横滚角和俯仰角。当背景磁场已知时,至少测量载体在4种方位姿态的三分量,即可求解式(1)、式(2)中的12个补偿系数。

文献[6]基于磁偶极子磁场分布理论,推导了捷联磁力仪所在位置的磁场组成,并最终简化为十二常数模型进行求解。

该模型需要借助惯导设备提供载体姿态信息,且需已知地理坐标系下的磁场分量,工作量大大增加,特别是实际应用中当载体较大时,将载体置于4种方位姿态校正难度很大。

### 2.2 Tolles-Lawson 模型

以飞行器上捷联三轴磁力仪探头为坐标原点,建立如图1所示的坐标系。 $X$ 轴与飞行器纵轴平行,向前为正; $Y$ 轴与飞行器横轴平行,向右为正; $Z$ 轴与飞行器的纵轴垂直,向下为正; $H_0$ 为地理坐标系下的地

磁矢量,  $H_d$  为干扰场矢量,  $X_0, Y_0$  和  $Z_0$  分别为  $X, Y, Z$  与  $H_0$  的夹角。

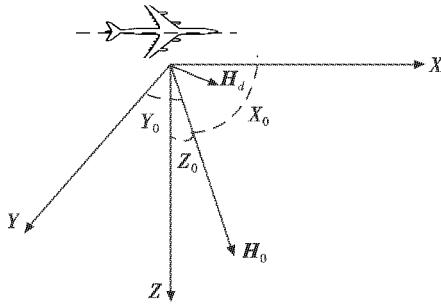


图1 捷联磁力仪载体坐标系模型

Fig.1 Body coordinate system model

设  $u_1 = \cos X_0, u_2 = \cos Y_0, u_3 = \cos Z_0$ , 则载体干扰磁场可表示为

$$H_d = \sum_{i=1}^3 p_i u_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} u_i u_j + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} u_i u_j' \quad (4)$$

式中:  $p_i, a_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别表示剩磁系数、感应磁场系数和涡流磁场系数;  $u_j'$  为方向余弦  $u_j$  的导数。此外, 有  $a_{ij} = a_{ji}$ , 模型参数共有 18 个。

Tolles-Lawson 模型可以实现动态环境下的磁场干扰补偿, 模型精确, 但是实验过程复杂, 需已知体坐标系与当地地理坐标系之间的夹角(方向余弦角), 需要外部设备的辅助。

### 2.3 姿态独立标定模型

由于目前地磁导航的匹配参量为地磁总场而不是地磁矢量, 因此利用体坐标系下的补偿模型就能满足要求, 且简单易行。利用总场信息对磁力仪进行标定无需姿态辅助信息, 被称为“姿态独立标定”。标定模型如图 2 所示, 通过最小化传感器输出值与真实磁场值之差的平方实现磁力仪的标定, 即

$$\operatorname{argmin} f(P, O) = \sum_{i=1}^m (R - \|P(B^s - O)\|_2)^2 \quad (5)$$

$$\widehat{B}^b = P(B^s - O) = K^{-1}(B^s - O) \quad (6)$$

$$K = \begin{bmatrix} \kappa_1 & 0 & 0 \\ \kappa_2 \sin \rho_1 & \kappa_2 \cos \rho_1 & 0 \\ \kappa_3 \sin \rho_2 \cos \rho_3 & \kappa_3 \sin \rho_3 & \kappa_3 \cos \rho_2 \cos \rho_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$O = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \end{bmatrix}$$

式中:  $\widehat{B}^b$  为标定后的磁场值;  $B^s = [B_x^s \ B_y^s \ B_z^s]$  为磁力仪输出矢量;  $\rho_1 \sim \rho_3$  为总非正交误差角;  $\kappa_1 \sim \kappa_3$  为刻度因子误差;  $o_1 \sim o_3$  为总零偏误差。

将式(6)平方并展开整理得  $AX = b, k$  为数据个

数, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} (B_x^s)^2 & B_x^s B_y^s & B_x^s B_z^s & (B_y^s)^2 & B_y^s B_z^s & B_x^s B_y^s & B_x^s B_z^s & 1 \\ (B_x^s)^2 & B_x^s B_y^s & B_x^s B_z^s & (B_y^s)^2 & B_y^s B_z^s & B_x^s B_y^s & B_x^s B_z^s & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (B_x^s)^2 & B_x^s B_y^s & B_x^s B_z^s & (B_y^s)^2 & B_y^s B_z^s & B_x^s B_y^s & B_x^s B_z^s & 1 \end{bmatrix} \\ X = -\frac{1}{a_6} [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_7 \ a_8 \ a_9 \ a_{10}] \\ b = [(B_x^s)^2 \ (B_y^s)^2 \ \dots \ (B_z^s)^2] \end{cases} \quad (8)$$

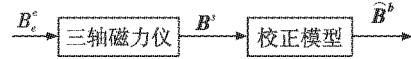


图2 传感器标定模型

Fig.2 Magnetometer calibration model

图 2 中,  $B_e^s$  为地理坐标系下的磁场值。

文献[7]指出, 总零偏误差包括磁力仪的零偏及载体的硬磁误差; 总刻度因子误差包括磁力仪的三轴非正交误差和载体的软磁误差; 总非正交误差源自磁力仪的制造工艺误差、安装误差及载体的软磁误差; 因此, 式(5)所表示的模型可以有效地表达出多种干扰因素对理想输出值的影响。

由式(5)、式(6)可知, 此模型只需已知磁力仪输出三分量以及精确的地磁总场值, 标定结果为地磁场在体坐标系下的投影, 标定过程简单, 但无法得到磁场在地理坐标系下的投影, 对于式(5)的标定模型, 代价函数是非线性的, 存在多个极值。

### 2.4 椭球(圆)拟合模型

美国学者 ELKAIM<sup>[8]</sup>, GEBRE<sup>[9]</sup> 等提出了二维磁场测量轨迹的椭圆方法, 文献[10]根据椭圆假设的思想, 提出了带有椭圆约束的最小二乘拟合法来确保所拟合的圆锥曲线为椭圆, 但是椭圆拟合将载体的运动限制在二维平面内, 针对此问题, 文献[11]提出了基于椭球约束的三维磁场补偿, 利用带椭球约束的最小二乘法保证拟合的曲面为椭球; 文献[12]在分析了磁测信息误差来源的基础上对椭球拟合法在磁力仪校正方面的应用进行了研究。

理想情况下, 标定后, 磁力仪输出的总场值与真实地磁总场值相等, 则有

$$R = \|\widehat{B}^b\|_2 = \|P(B^s - O)\|_2 \quad (9)$$

为了避免开根号运算, 将等式两边进行平方操作

$$R^2 = \|\widehat{B}^b\|_2^2 = \|P(B^s - O)\|_2^2 \quad (10)$$

将式(10)展开并整理, 可得

$$R^2 - \|P(B^s - O)\|_2^2 = a_1 (B_x^s)^2 + a_2 B_x^s B_y^s + a_3 B_x^s B_z^s + a_4 (B_y^s)^2 + a_5 B_y^s B_z^s + a_6 (B_z^s)^2 + a_7 B_x^s + a_8 B_y^s + a_9 B_z^s + a_{10} \quad (11)$$

式(11)是一个椭球方程, 测量轨迹被限制在一个椭球

面上,求解本质是通过寻找一组参数使得测量数据到拟合椭球面的代数距离最小。令  $J = a_1 a_4 + a_1 a_6 + a_4 a_6 - (\frac{1}{2} a_2)^2 - (\frac{1}{2} a_3)^2 - (\frac{1}{2} a_5)^2$ ,  $I = a_1 + a_4 + a_6$ ,  $\xi = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9 \ a_{10}]^T$ ,  $H = [(B_x^s)^2 \ B_x^s B_y^s \ (B_y^s)^2 \ B_x^s B_z^s \ B_y^s B_z^s \ (B_z^s)^2 \ B_x^s \ B_y^s \ B_z^s \ 1]$ , 则有  $r = R^2 - \|P(B^s - O)\|_2^2 = H\xi$ , 通过估计  $\xi$ , 使得残差  $r$  最小, 即

$$\begin{aligned} \hat{\xi} &= \min_{\xi} \|r\|_2 = \min_{\xi} (\xi^T H^T H \xi) \quad (12) \\ \text{s. t. } &\xi \neq 0, \quad \alpha J - I^2 > 0 \end{aligned}$$

当  $\alpha = 4$  时, 拟合得到椭圆方程系数。

椭球拟合模型是建立在椭球假设的前提下, 补偿精度取决于所拟合的椭球参数的精度, 补偿精度较高, 但是对于数据采集时载体的姿态要求也较高, 如果磁力仪三分量测量值无法拟合成一个椭球, 则无法使用此模型。

### 3 磁测误差补偿方法

磁测误差补偿问题实际就是从三轴磁力仪的测量值中确定补偿参数, 进而对测量值进行补偿, 从而得到准确的磁场值, 本质是参数估计问题, 补偿精度与求解的参数精度息息相关。

针对以上几种模型, 国内外众多学者展开了探讨研究。

针对 Tolles-Lawson 模型, 文献[13]提出了一种基于小信号的磁场补偿方法, 要求载体沿直线做小幅度机动, 具有一定的局限性, 且当载体进入新的航向时, 需要重新求解模型参数; 文献[14]在此模型基础上考虑了地磁梯度的影响, 提出了一种折线飞行学习方法, 飞行器的背景磁场补偿精度较高; 文献[15]提出了将岭估计的预测残差平方和(PRESS)引入模型的求解方法, 通过计算时间序列的预测残差平方和来选择最小预测残差平方和意义下的最优岭参数。针对“姿态独立标定”模型, 也就是“模标定”模型, 众多学者展开了研究。

文献[16]分别采用信赖域法和 EKF 方法进行参数估计, 验证信赖域法处理非线性问题的优越性。针对式(8), 最小二乘算法及其相关算法相继被提出。文献[17-18]利用最小二乘算法实现了线性化模型的参数求解; 文献[19]采用自适应最小二乘算法进行参数估计; 文献[20]采用递归约束总体最小二乘(RTLS)算法, 在递归更新阶段避免了矩阵求逆的操作, 使得数值求解过程更加稳定。

总体最小二乘算法<sup>[21]</sup>考虑了线性方程两端均存在的噪声误差, 进一步提高了补偿的准确性。总体最

小二乘算法适用于处理方程两端存在误差的情况, 但是无法解决磁场数据不充分引起的病态问题。

针对椭圆(球)拟合模型, 文献[22]针对系数矩阵导致算法不稳定的问题, 提出了改进的最小二乘椭圆拟合算法; 文献[23]采用两步估计和基于圆约束的磁力仪校正方法。

文献[24]提出了智能优化算法对磁力仪进行标定。利用统计类优化方法, 对非线性观测方程直接进行求解, 且对初始值没有要求, 但存在“早熟”现象。文献[25]提出了伸展粒子群优化的磁测误差补偿方法, 克服了粒子群算法过早收敛的缺陷, 取得了更高的精度和更优的鲁棒性。

## 4 磁测误差补偿的关键问题

### 4.1 高精度补偿模型的建立

2节详细介绍了目前研究的几种主流模型, 每个模型都有不同的适用条件, 经典的 Tolles-Lawson(T-L)模型不仅包含磁力仪的三轴非正交误差、刻度因子误差和零偏误差, 而且考虑了飞行载体引入的软磁干扰、硬磁干扰和涡流磁场干扰, 磁力仪、惯导系统与载体间的非对准误差也可以同时被校正, 是一种精度较高的磁干扰补偿模型, 因此有必要对 T-L 模型的求解方法继续探究。首先可以采用 Ansoft maxwell 软件实现动态环境下的磁场特性的研究, 然后利用外场试验验证。

### 4.2 最优采样点的编排优化

模标定方法要求捷联磁力仪能够在欧拉空间全方位转动, 然而实际测量中, 除了部分小型载体外, 绝大多数载体无法实现, 这就意味着磁力仪只能输出部分空间姿态分布的数据, 有可能导致测量数据的空间分布不合理。因此研究最优采样点的选取对于磁测误差补偿具有重要的意义。

目前, 国内在此方面的研究较少, 已有成果包括: 文献[6]将均匀优化设计引入十二常系数模型中, 解决了复杂模型难以通过常规方法求全局最优的问题; 文献[26]采用 D 优化方法, 提出了一种在转动空间有限的情况下磁力仪的优化编排方法。

上述方法改善了空间数据的分布情况, 达到了激励磁场测量误差的目的。

### 4.3 病态问题

采用传统最小二乘算法及其相关改进方法进行参数估计, 是基于随机误差分布为高斯分布或者没有考虑到观测方程的病态问题。

奇异值分解在求解病态线性方程组时具有很高的稳定性<sup>[27]</sup>, 但是需要对其奇异值进行截断处理。文献[28-29]尝试将 Tikhonov 正则化方法与总体最小二乘

算法结合,通过截断较小奇异值对应的解部分以增强解的稳定性;文献[30]提出了加阻尼截断奇异值分解法;文献[31]以陆用车载导航为应用背景,提出了截断总体最小二乘技术对病态的磁力仪标定问题进行求解。

针对迭代法解非线性最小二乘问题的病态问题,文献[32]采用了阻尼最小二乘进行参数估计;文献[33]提出了基于有限脉冲响应模型的磁补偿方法;文献[34]提出了截断总体最小二乘算法。上述方法可以有效改善磁测误差补偿的病态问题,达到了良好的补偿效果。

此外,可以借鉴大地测量中对于不适定问题的处理方法,尝试将其应用于磁测误差补偿的病态问题。

## 5 未来展望

通过以上模型可知,磁测误差补偿问题可以转化为参数估计问题,参数估计精度直接影响补偿效果,为提高参数估计精度可从以下几个方面着手。

### 1) 精确的参数模型。

不同的模型具有不同的适用条件。根据已有实验条件,选择不同的补偿模型可以得到不同的补偿精度。寻找精确模型而不是简化模型的参数求解方法,以模拟真实作战环境下磁场测量误差补偿。

### 2) 有效的测量噪声抑制方法。

测量噪声是影响参数估计精度的重要因素之一。对于非线性参数模型,通常将其进行线性化处理,噪声特性很可能随之发生变化,由此增加了抑制噪声的难度。最佳方式是采用非线性优化策略直接对模型进行求解,但到目前为止,鲜有相关的报道。

### 3) 优化观测数据的空间分布。

为了求解模型参数,需要已知载体在不同姿态下的欧拉角,但实际应用中,大型载体由于机动性能及控制系统的限制,难以实现。因此,在有限的范围内,如何优化载体的姿态,利用有代表性的姿态数据获取更高精度的补偿效果是今后需要继续研究的方向。

磁测误差补偿工作是一个关键而又有挑战性的工作,但受到软件、硬件、资金等条件的制约,如何构建载体工作的真实环境,模拟载体真正的工作状态是下一步需要研究的问题。

此外,应大力发展地磁矢量测量误差补偿技术。地磁场是一个信息丰富的矢量场,受限于目前磁场寻北技术,难以提取地理坐标系下的地磁矢量进行补偿。因此,有必要在已有技术的基础上,研究地磁矢量补偿,为地磁导航矢量匹配奠定基础。

## 参 考 文 献

[1] 郭才发,胡正东,张士峰,等. 地磁导航综述[J]. 宇航

学报,2009,30(4):1314-1319.

- [2] 周军,葛致磊,施桂国,等. 地磁导航发展与关键技术[J]. 宇航学报,2008,29(5):1467-1472.
- [3] 李季. 地磁测量中载体干扰磁场特性及补偿方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
- [4] TOLLES W E. Compensation of aircraft magnetic field: United States, 2692970[P]. 1954-10-26.
- [5] 张学孚,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [6] 杨云涛,石志勇,关贞珍,等. 一种基于磁偶极子磁场分布理论的磁场干扰补偿方法[J]. 兵工学报,2008,29(12):1485-1491.
- [7] FOSTER C C, ELKAIM G H. Extension of a non-linear, two-step calibration methodology to include non-orthogonal sensor axes[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2008, 44(3):1070-1087.
- [8] GEBRE E D, ELKAIM G H, POWELL J D, et al. Calibration of strapdown magnetometers in magnetic field domain[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2006, 19(2):87-102.
- [9] GEBRE E D. Magnetometers autocalibration leveraging measurement locus constraints[J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4):1361-1368.
- [10] 张晓明,赵剡. 基于椭圆约束的新型载体磁场标定及补偿技术[J]. 仪器仪表学报,2009,30(11):2438-2443.
- [11] 于振涛,吕俊伟,稽绍康. 基于椭球约束的载体三维磁场补偿方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2014,35(6):731-734.
- [12] 黄学功,王旻. 地磁信号检测系统误差分析与补偿方法研究[J]. 兵工学报,2011,32(1):33-36.
- [13] BICKEL S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, 15(4):518-525.
- [14] 周建军,林春生,赵建扬. 无人飞行器背景磁场学习方法研究[J]. 兵工学报,2014,35(1):76-82.
- [15] 张坚,林春生,罗青,等. 基于预测残差平方和的飞机干扰磁场模型求解[J]. 探测与控制学报,2010,32(5):74-78.
- [16] 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.
- [17] 庞鸿锋,罗诗途,陈棣湘,等. 任意姿态变化下的磁通门传感器误差校正[J]. 测试技术学报,2011,25(4):371-375.

- [18] 张琦,潘孟春,陈棣湘,等. 基于线性参数模型的三轴磁场传感器校准方法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(2):215-219.
- [19] VALERIE R, MUHAMMAD H A, GERARD L. Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain [J]. Journal of sensors, 2010. doi:10.1155/2010/967245.
- [20] RHODE S, USEVICH K, MARKOVSKY I, et al. A recursive restricted total least-squares algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(21):5652-5662.
- [21] 吴志添,武元新,胡小平,等. 基于总体最小二乘的捷联三轴磁力仪标定与地磁场测量误差补偿[J]. 兵工学报, 2012, 33(10):1202-1209.
- [22] CRASSIDIS J L, LAI K, HARMAN R R. Real-time attitude independent three-axis magnetometer calibration [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2005, 28(1):115-120.
- [23] 孙宏伟,房建成,李艳. 椭圆拟合法在磁罗盘罗差校准中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):3034-3039.
- [24] 周建军,林春生,张坚. 基于蚁群算法对三轴磁强计非正交度的修正[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(2):106-109.
- [25] WU Z T, WU Y X, HU X P, et al. Calibration of three-axis strapdown magnetometers using particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(2):281-292.
- [26] 吴志添. 面向水下地磁导航的地磁测量误差补偿方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- [27] 何昌礼. 解病态线性方程组的奇异值分解及其应用[M]. 北京:中国地质大学出版社, 1990.
- [28] SIMA D M, VAN HUFFEL S. Level choice in truncated total least squares [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2007, 52(2):1103-1118.
- [29] FIERRO R D, GOLUB G H, HANSEN P C, et al. Regularization by truncated total least squares [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1997, 18(4):1223-1241.
- [30] 庞学亮,林春生,张宁. 飞机磁场模型系数的截断奇异值分解法估计[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(5):48-51.
- [31] 张滢,杨任农,李明阳,等. 基于截断总体最小二乘算法的车载三轴磁力仪标定[J]. 兵工学报, 2015, 36(3):427-432.
- [32] 朱学军,潘孟春,张琦,等. 三轴磁强计输出误差的综合补偿方法[J]. 测试技术学报, 2014, 28(6):526-531.
- [33] 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]. 震动、测试与诊断, 2009, 29(4):462-465.
- [34] 王立辉,余乐,梁冰冰,等. 截断总体最小二乘法在抑制地磁导航磁力仪随机误差方面的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(6):763-768.

(上接第59页)

- [6] STARZYK J A, ZHU Z. Averaging correlation for C/A code acquisition and tracking in frequency domain [C]//IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2001:905-908.
- [7] TANG B, LIU S S, TANG W T, et al. Design a L1 software receiver based on IF GPS signal simulator [C]//The 8th International Conference on Signal Processing, Beijing, 2006:112-115.
- [8] 陈希,张锐,帅涛. 基于FFT的GPS快速并行捕获算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(1):162-166.
- [9] 熊竹林,刘策伦,安建平,等. 低复杂度高动态低信噪比环境下的GPS信号捕获算法[J]. 通信学报, 2015, 36(3):179-184.
- [10] ABOUD A H, RAMADAN R, ALSHARABATI T. Software defined radio implementing GPS parallel frequency space search acquisition algorithm in real time environment [C]//International Conference on Information and Communication Technology Research, 2015:234-237.
- [11] 李新山,郭伟. 基于平均相关和差分相干累积的微弱GPS C/A码信号精密捕获算法[J]. 通信学报, 2015, 36(5):1-4.