

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.09.021

## 基于 pisson 数学模型的传感器误差补偿研究

许杨<sup>1</sup>, 孙晖<sup>2</sup>, 孔繁茂<sup>2</sup>, 胡隆基<sup>3</sup>, 王开辉<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院 1 系, 石家庄 050003; 2. 沈阳军区装备部, 沈阳 112400;  
3. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012)

**摘要:** 利用三轴磁力仪对地磁场进行测量时, 需要对测量点的磁干扰进行补偿, 为了降低补偿费用, 在传统的地磁十二分量参数法的基础上, 结合传感器安装误差的特点, 提出一种新的补偿方法, 并且在采用铁块模拟载体实际使用环境下的干扰利用该方法进行补偿实验。实验结果表明: 该补偿模型能有效提高地磁总场的测量精度, 将误差由原来的 $-258 \sim 3\,430$  nT 提高到了 $\pm 91$  nT 以内。

**关键词:** 磁力仪; 误差补偿; pisson 模型

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Study on Magnetic Sensor Error Compensation Method Based on pisson Math Model

Xu Yang<sup>1</sup>, Sun Hui<sup>2</sup>, Kong Fanmao<sup>2</sup>, Hu Longji<sup>3</sup>, Wang Kaihui<sup>2</sup>

(1. No. 1 Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;  
2. Dept. of Equipment, Shenyang Provincial Military Region, Shenyang 112400, China;  
3. No. 63961 Unit of PLA, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Use three-axis magnetic instrument to measure ground magnetic field, and compensate the magnetic disturbance of measurement point. For reduce compensation cost, based on tradition 12-heft parameter method, combine the feature of sensor installation error, put forward a new compensation method, use this method to carry out compensation test by adopting iron block to simulate carrier disturbance under real environment. The results show that this method effectively improves the magnetic measure accuracy, and the error is improved from  $-258 \sim 3\,430$  nT to  $\pm 91$  nT.

**Key words:** magnetic instrument; error compensation; pisson model

### 0 引言

地磁导航是一种基于测量地磁场信号进行定位的装置。与传统 GPS、惯性导航方法相比, 地磁导航系统具有体积小、能耗低、结构简单、成本低、定向时间短和可自主寻北等特点<sup>[1]</sup>。但实际应用中受载体复杂磁场干扰的影响, 地磁导航的性能受到了很大制约。因此, 研究合适的地磁测量补偿方法是提高地磁导航精度的必要工作。

目前地磁导航系统补偿方法较多, 比较有代表性的就是基于椭圆拟合的补偿方法和正弦波校正方法。但实际应用中测量数据往往不能准确地表现出椭圆规律, 椭圆拟合法差强因素较多, 造成该方法的补偿效果受限。正弦波校正方法只能拟合出传感器输出的规律, 因此也决定了该方法只能作为一种辅助的手段, 不能够自成体系形成一套完整的补偿算法<sup>[2-3]</sup>。

通过分析磁场干扰的机理, 结合传感器安装误差的干扰因素, 笔者提出一种基于十二分量法<sup>[4]</sup>结合安装误差的地磁测量误差补偿方法, 通过实验表

明, 该算法能有效地提高地磁测量的精度。

### 1 载体干扰磁场的机理

按载体磁场干扰因素的特性分析, 可将干扰源分为硬磁材料和软磁材料; 硬磁材料的固有磁场是不变的, 对载体磁场干扰表现为对载体磁场附加一个固定大小固定方向的矢量, 其矢量大小受外界因素影响较小, 不会随着载体姿态的变化而变化, 可以理解为一个常值。软磁材料能够用相对较低的磁场强度磁化, 当外磁场移走后表现出较弱的剩磁, 其感应磁场的大小随磁场的变化而变化<sup>[5]</sup>。

根据磁场干扰的特点和地磁传感器的实际应用环境, 取某点磁场磁感线变化过程如图 1 所示。

当磁场未受到干扰时, 可以认为磁场磁感线近似为平行的直线; 当受到软磁材料影响时, 由于软磁材料在磁化磁感线作用下方向磁矩不等使磁感线发生形变, 同时引起此点的总场矢量方向也发生了变化。当受到硬磁材料影响时, 相当于在该点附加一恒值的矢量场, 所以该点的总场矢量大小和方

收稿日期: 2012-04-29; 修回日期: 2012-05-29

作者简介: 许杨(1984—), 男, 硕士研究生, 从事信号处理、智能导航定位的研究。

向都发生的改变(图 1 用位移表示其大小变化)。

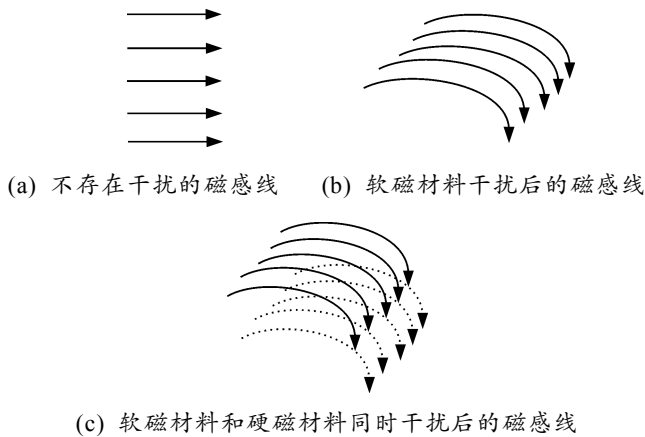


图 1 某点磁场磁感线变化过程

### 2 安装误差校正及模型建立方法

通过分析载体干扰磁场作用的机理,可以知道影响地磁传感器性能的主要因素就是载体环境磁感线的变化导致不能准确地判断地磁参量。

笔者取某点磁感线水平面放到直角坐标系分析如图 2 所示。

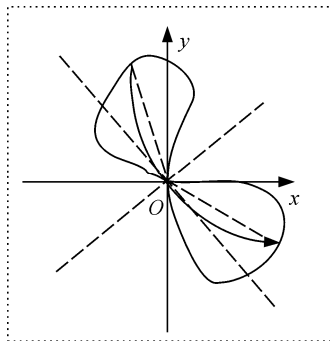


图 2 磁感线水平截面示意图

由软磁材料和硬磁材料的干扰性质分析,硬磁材料的干扰使磁感线发生了常值的变化;将硬磁干扰向量定义为向量  $t$ 。软磁材料的干扰使磁感线发生了弯曲,根据软磁材料不同方向的磁矩不同和地场磁感线的方向不变性,将变形后的磁感线拟合为抛物线更能贴切地表示其变化规律。通过对磁感线抛物线的分析补偿可以计算出磁场未经干扰的数据,从而准确地判断出测量点的方向。

通过分析可以把某点传感器旋转  $360^\circ$  所测量的数据拟合为一个正弦曲线,建立直角坐标系分别取  $x$  轴和  $y$  轴,  $y$  轴和  $z$  轴,  $z$  轴和  $x$  轴所组成的平面,测量探头在各平面的最大值分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  以及最大值方向与  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的夹角分别为  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ , 传感器探头姿态与最大值方向夹角为

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$ 。

从传感器三轴正交特性可得:

$$F_x = A_1 \cos(\varphi_1 - \theta_1) = A_3 \sin(\varphi_3 - \theta_3) \quad (1)$$

$$F_y = A_2 \cos(\varphi_2 - \theta_2) = A_1 \sin(\varphi_1 - \theta_1) \quad (2)$$

$$F_z = A_3 \cos(\varphi_3 - \theta_3) = A_2 \sin(\varphi_2 - \theta_2) \quad (3)$$

通过式 (1)、式 (2)、式 (3) 可以通过测量的验证传感器三轴的正交性并得到精确的正交误差角度。设  $Oxyz$  坐标系为传感器三轴探头的理想正交坐标系,由于制造误差而引起的  $x$  轴向的探头与  $Oxyz$  的夹角分别为  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ ,  $y$  轴向的探头与  $Oxyz$  的夹角分别为  $\eta_x$ 、 $\eta_y$ 、 $\eta_z$ ,  $z$  轴向的探头与  $Oxyz$  的夹角分别为  $\xi_x$ 、 $\xi_y$ 、 $\xi_z$ , 则正交误差在传感器三轴的分量可表示为:

$$\begin{bmatrix} F_{ox} \\ F_{oy} \\ F_{oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega_x & \cos \omega_y & \cos \omega_z \\ \cos \eta_x & \cos \eta_y & \cos \eta_z \\ \cos \xi_x & \cos \xi_y & \cos \xi_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

在附加载体模拟实际使用状态的情况下,可以将载体从软磁和硬磁材料 2 个方面分析干扰特性。硬磁材料的磁场干扰机理较为简单,相当于在某一方向上施加一固定的场强;而软磁材料的磁场干扰机制需要较为复杂的推理。从文献[6-7]可知,软磁材料在磁矩轴向上的三轴感应磁场强度为:

$$F_{ix} = \frac{3\mu M}{8\pi r^3} \sin 2\alpha \cos \beta \quad (5)$$

$$F_{iy} = \frac{3\mu M}{8\pi r^3} \sin 2\alpha \sin \beta \quad (6)$$

$$F_{iz} = \frac{\mu M}{2\pi r^3} (1 - \frac{3}{2} \sin^2 \alpha) \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为磁场感应系数;  $M$  为代表软磁材料特性的磁矩;  $r$  为软磁材料与测量点的直线距离。

各标量如图 3 所示。

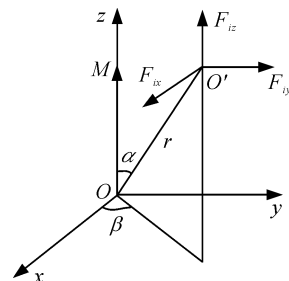


图 3 各标量位置

考虑到测点与干扰载体的相对位置不变,随着载体姿态的变化  $\mu$ 、 $r$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为定值,分析感应磁场主要考虑磁矩  $M$ 。

设载体在三轴方向的磁化系数分别为  $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$ ，则载体坐标系的三轴磁矩分别为：

$$M_x = \lambda_x(F_x + F_{cx}) \quad (8)$$

$$M_y = \lambda_y(F_y + F_{cy}) \quad (9)$$

$$M_z = \lambda_z(F_z + F_{cz}) \quad (10)$$

其中  $F_{cx}$ 、 $F_{cy}$ 、 $F_{cz}$  为载体硬磁干扰磁场。

通过式 (5)、式 (6) 和式 (7) 可以得到各磁矩对三轴分量的磁化影响  $F_{xx}$ 、 $F_{xy}$ 、 $F_{xz}$ 、 $F_{yx}$ 、 $F_{yy}$ 、 $F_{yz}$ 、 $F_{zx}$ 、 $F_{zy}$ 、 $F_{zz}$ 。

由此推导个磁矩影响下测量磁场值的数据公式

$$F_{mx} = F_{zx} - F_{yy} + F_{zx} + F_{cx} + F_x \quad (11)$$

$$F_{my} = F_{xy} + F_{yz} + F_{zy} + F_{cy} + F_y \quad (12)$$

$$F_{mz} = -F_{xx} - F_{yx} + F_{zz} + F_{cz} + F_z \quad (13)$$

其中  $F_{mx}$ 、 $F_{my}$ 、 $F_{mz}$  为传感器测量的数据。

结合 *pisson* 建立的数学模型描述<sup>[8]</sup>将公式(11)、(12)、(13) 整理合成得：

$$\begin{bmatrix} F_{mx} - F_{cx} \\ F_{my} - F_{cy} \\ F_{mz} - F_{cz} \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} F_x + F_{cx} \\ F_y + F_{cy} \\ F_z + F_{cz} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{\mu\lambda_x}{2\pi^3}(1-\frac{3}{2}\sin^2\alpha_x)+1 & -\frac{3\mu\lambda_y}{8\pi^3}\sin 2\alpha_x \sin \beta_y & \frac{3\mu\lambda_z}{8\pi^3}\sin 2\alpha_x \cos \beta_z \\ \frac{3\mu\lambda_x}{8\pi^3}\sin 2\alpha_x \sin \beta_x & \frac{\mu\lambda_y}{2\pi^3}(1-\frac{3}{2}\sin^2\alpha_y)+1 & \frac{3\mu\lambda_z}{8\pi^3}\sin 2\alpha_y \sin \beta_z \\ -\frac{3\mu\lambda_x}{8\pi^3}2\sin \alpha_x \cos \beta_x & -\frac{3\mu\lambda_y}{8\pi^3}\sin 2\alpha_y \cos \beta_y & \frac{\mu\lambda_z}{2\pi^3}(1-\frac{3}{2}\sin^2\alpha_z)+1 \end{bmatrix}$$

结合三轴传感器安装误差式 (14) 中的  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  实际值为式 (4) 中的  $F_{ox}$ 、 $F_{oy}$ 、 $F_{oz}$  因此整理得

$$\begin{bmatrix} F_{mx} - F_{cx} \\ F_{my} - F_{cy} \\ F_{mz} - F_{cz} \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \cos \omega_x F_x + \cos \omega_y F_y + \cos \omega_z F_z + F_{cx} \\ \cos \eta_x F_x + \cos \eta_y F_y + \cos \eta_z F_z + F_{cy} \\ \cos \xi_x F_x + \cos \xi_y F_y + \cos \xi_z F_z + F_{cz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由于式 (15) 中系数矩阵  $\mathbf{K}$  的各量为常值， $\omega_x, \omega_y, \omega_z, \eta_x, \eta_y, \eta_z, \xi_x, \xi_y, \xi_z$  为已知量，因此可以通过最少 4 组状态即可解得关于干扰前和干扰后的误差补偿模型，实现对载体的补偿。

### 3 实验结果及误差分析

在实验室内运用无磁三轴转台、FVM-400 三轴磁通门磁力仪和体积为 0.003 m<sup>3</sup> 的矩形铁块进行实验，首先，调整三轴转台初始状态归零，将磁力仪安装于转台的中心位置，调整转台姿态分别记录 8 种不同姿态安装铁块和不安装铁块的地磁三分量的数据，实验数据如表 1 所示。

表 1 消除载体磁场干扰数据

转台姿态 ( $\varphi, \gamma, \theta$ )	未安装铁块时			安装铁块时		
	$F_{mx}$ / nT	$F_{my}$ / nT	$F_{mz}$ / nT	$F_{mx}$ / nT	$F_{my}$ / nT	$F_{mz}$ / nT
0°, 0°, 0°	-17 811	24 485	35 504	-16 214	25 628	36 443
45°, 12°, 16°	-7 045	22 012	40 520	-5 469	23 690	42 141
90°, 4°, -8°	29 391	15 450	33 113	29 270	17 596	36 119
135°, 20°, 8°	25 133	-16 369	35 879	25 189	-13 637	38 534
180°, 16°, -12°	23 255	-33 138	23 351	22 723	-30 912	25 120
225°, -8°, 4°	-7 251	-24 485	39 032	-6 156	-22 245	40 098
270°, -4°, 20°	-35 568	-15 028	26 358	-33 554	-13 592	25 781
315°, 8°, -20°	-15 612	-530	43 866	-13 992	1 413	45 620

将实验数据代入式 (15) 求得系数矩阵  $\mathbf{K}$ ，然后使转台处于随机选择的 5 种姿态下，按上述实验步骤分别测量安装铁块和未安装铁块时各种姿态

下的磁场三分量，并计算 5 种姿态补偿后的磁场三分量，最后统计 5 种姿态下磁场总场的实验数据如表 2 所示。

表 2 磁场测量误差分析

转台姿态 ( $\varphi, \gamma, \theta$ )	未安装铁块时 $F$ / nT	安装铁块时 $F_m$ / nT	校正后数据 $F_a$ / nT	校正前误差 $\Delta F_f$ / nT	校正后误差 $\Delta F_a$ / nT
0°, 32°, -32°	46 659	50 089	46 689.6	3 430	30.6
72°, 8°, -8°	46 827	50 401	46 852.1	3 574	25.1
144°, 40°, -24°	46 706	46 448	46 700.6	-258	-5.4
216°, -16°, 16°	46 596	47 643	46 657.7	1 047	61.7
288°, 24°, 0°	46 624	45 639	45 639.0	-985	-91.0

从实验结果可见，相对于原状态不同姿态铁块干扰后误差最大达 3 574 nT，通过此方法校对后误差

减小到 91 nT，极大地提高了传感器测量的准确性。笔者提供了一个可靠的误差补偿方法，其运算

结果稳定且均值平稳，有着相当好的补偿效果，该方法计算量小，仅通过传感器本身的数据就可以完成运算，对设备的要求较小，有很强的实用性。

### 4 结束语

基于传感器安装误差的产生机理，结合 *pisson* 数学模型描述，研究了磁干扰环境下地磁测量误差补偿的方法，改善了传统十二分量法在地磁测量时大姿态角度误差较大的情况；该方法不需要复杂的操作和对专业设备的依赖，只需要传感器不同姿态测量数据之间的相互关系就可以完成对磁干扰的补偿，具有很高的应用价值和前景。

### 参考文献：

[1] Goldenberg F. Geomagnetic navigation beyond the

\*\*\*\*\*

(上接第 66 页)

在中央控制系统中，采用工控机通过组态王软件进行参数设置及状态监控<sup>[5]</sup>。各个分系统应用了触摸屏进行本地的参数设置。通过 CC-Link 总线，在工控机的组态王程序中实时显示从加热单元传送过来的预装水温、预装药温、补装水温、补装药温，中控室的操作人员据此可对生产现场进行准确的操控，同时在组态王程序中将每台螺装机的产量和卡壳数存储于“生产过程实时数据表”中，整条生产线的控制系统总体结构图如图 2 所示。

magnetic aompass [C]//Ir position, Location And Navigation symposium. IEEE/ION, 2006: 684-649.

[2] 王维, 张英堂, 罗鸿飞. 椭圆拟合在某新型磁定向系统罗差补偿中的应用研究[J]. 军械工程学院学报, 2009, 6(21): 3.

[3] 雷志术, 张雁波. 椭圆定形曲线拟合问题若干新型算法[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(8): 1210-1213.

[4] 刘诗斌. 无人机航向测量的自动罗差补偿研究[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 2.

[5] 张学孚, 陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 5.

[6] 任来平, 张启国, 马刚. 水下铁磁体的海面磁场计算模型研究[J]. 海洋测绘, 2004, 24(6): 16-19.

[7] 任来平, 赵俊生, 侯世喜. 磁偶极子磁场空间分布模式[J]. 海洋测绘, 2002, 22(2): 18-21.

[8] Hine A. Magnetic Compasses and Magnetometers[M]. London: AdamHilgerLTD, 1996.

表 1 弹体标识

位	含义	备注
0 ~ 19	上线时间	
20 ~ 23	分配标记	0=未分配, 1=1#螺装(钻孔), 2=2#螺装(钻孔), 3=...#螺装(钻孔), 4=...#螺装(钻孔)
24 ~ 26	弹类型	0=空车, 1=普通弹, 2=实际密度弹, 3=开合弹
27	预装完成标志	0=未完成, 1=完成
28	螺装完成标志	0=未完成, 1=完成
29	钻孔完成标志	0=未完成, 1=完成
30	成品输送链完成标志	0=未完成, 1=完成
31	成品状态	0=正常, 1=卡壳

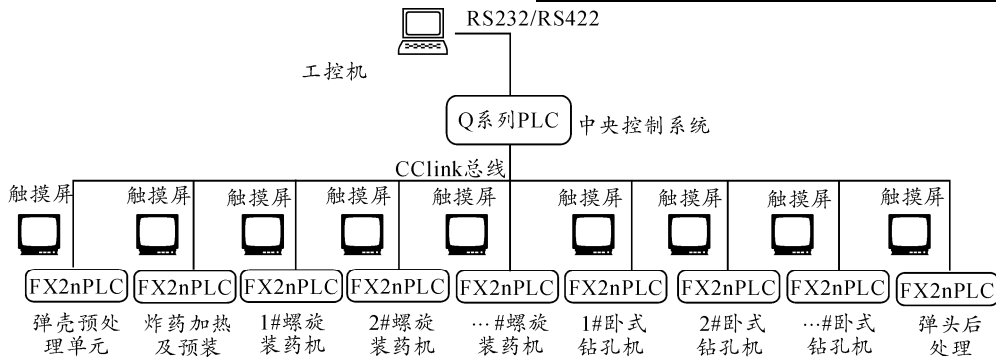


图 2 生产线控制系统总体结构

### 3 结论

炮弹螺装生产线已在某军工企业得到了成功应用，极大地改善了一线生产工人的劳动环境，提高了生产过程中的安全性，降低了工人的劳动强度，提高了劳动生产率。

### 参考文献：

[1] 宋清昆, 武俊峰, 吕宁. 炮弹注药生产线集散控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(5): 1-2.

[2] 三菱电机自动化(上海)有限公司. FX2N-16CCL-M CC-Link 系统主站模块 FX2N-32CCL CC-Link 接口模块用户手册[S]. 上海: 菱电自动化(上海)有限公司, 2003.

[3] 阳宪惠. 工业数据通信与控制网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[4] 温士武, 姚兰英. 弹体装药与炮弹装配技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1988.

[5] 北京亚控科技发展有限公司. 组态王 6.53 产品介绍[S]. 北京: 北京亚控科技发展有限公司, 2008.