

# 三分量磁通门传感器水平修正方法

闫 辉 肖昌汉 张朝阳

(海军工程大学 电气与信息工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘 要:**三分量磁通门传感器是磁场测量中普遍使用的仪器,磁传感器的测量坐标系由三个正交的螺线管确定,但是这种传感器的测量坐标系的水平坐标平面通常不平行于其基座水平面,这样一个倾斜的测量坐标系会带来测量误差。为了解决这一问题,提出了采用共轭梯度优化的方法求解水平修正参数,进而修正由坐标系不水平带来的误差的方法。采用该方法计算了某一三分量磁通门传感器的水平修正参数,经过修正后的传感器,其性能得到了明显改善。

**关键词:**三分量磁通门传感器,磁场测量,共轭梯度优化方法

**中图分类号:** TM936.1 **文献标识码:** A

## Horizontal Calibration to Triaxial Fluxgate Magnetometer

Yan Hui Xiao Changhan Zhang Zhaoyang

(Electric & Information Eng College, Naval Univ of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Triaxial fluxgate magnetometer is an instrument often used in the measurement of magnetic field. The coordinate system of a magnetometer is determined by three orthogonal solenoids, but the horizontal coordinate plane of such a coordinate system is not always precisely parallel to the plane of its base plane. A leaning coordinate system will lead to some errors. In order to solve the problem, a method of conjugate gradient optimization was applied to find the horizontal error angles. An experiment was done to calculate horizontal error angles of a triaxial fluxgate magnetometer. The performance of the sensor is improved greatly after the horizontal calibration.

**Keywords:** triaxial fluxgate magnetometer, measurement of magnetic field, conjugate gradient optimization

三分量磁通门传感器是舰船磁场测量、地磁场测量、水中兵器引信及舰船导航中常用的仪器。这种传感器内部由三个螺线管作为其对三维磁场的敏感元件,这三个螺线管确定了一个正交的测量坐标系。但是由于加工工艺等原因,使这样一个由三个螺线管确定的坐标系存在两个系统误差源:(1)坐标系三个坐标轴不完全正交;(2)坐标系相对水平基座倾斜,也就是说,一个水平放置的传感器,其测量坐标系的  $XOY$  坐标平面理论上应该是水平的,但实际上并不绝对水平。在这里,我们称对前一个误差源的修正为正交修正,对后一个误差源的修正为水平修正。

在地磁场环境下,如果三分量磁传感器的不正交度大于  $0.5^\circ$ ,则磁场总量的测量误差将大于  $400\text{nT}^{[1]}$ 。如果三分量磁传感器的坐标参考系不水

平,在磁场测量中表现为:恒定磁场下,基座水平放置的传感器,绕  $Z$  轴旋转时,其输出矢量的  $Z$  分量测量值不相同。因此,这样一个测量坐标系不水平的磁传感器会给输出矢量带来测量误差。文献 [2] 提出了一种正交修正参数的共轭次梯度搜索方法,文献 [3] 提出了光干涉和传感器旋转两种方法,它们都很好解决了对传感器进行正交修正的问题。本文针对三分量磁通门传感器测量坐标系相对其基座不水平的问题,提出了采用共轭梯度优化算法计算水平修正参数,进而进行水平修正的方法。

## 1 水平修正方法

### 1.1 问题的数学描述

在假设三分量磁通门传感器利用文献 [2] 提出

本文于 2005 年 9 月收到。闫辉:工程师,博士研究生;肖昌汉:教授,博士;张朝阳:助理工程师,硕士研究生。

的方法进行正交修正后,能够达到理想正交的前提下,我们只需考虑对理想正交坐标系的水平修正问题。设:(1)三分量磁通门传感器实际的坐标系与理想无倾斜坐标系分别为  $O - X_1 Y_1 Z_1$ 、 $O - X_0 Y_0 Z_0$ ;(2) $OX_1$ 在  $OX_0 Z_0$ 平面内, $OY_0$ 在  $OY_1 Z_1$ 平面内;(3) $OX_1$ 轴与  $OX_0$ 轴的夹角为  $\theta_0$ , $OY_1$ 轴与  $OY_0$ 轴夹角为  $\phi_0$ (见图 1),这两个角我们称之为水平误差角。

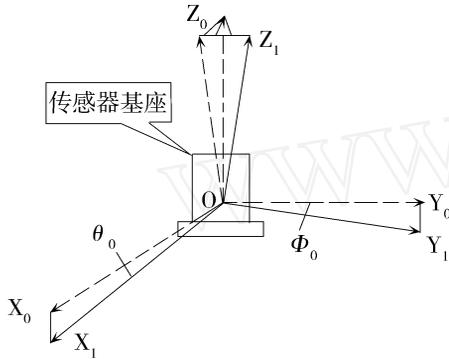


图 1 不水平的磁传感器坐标参考系

三分量磁通门传感器的输出可表示为:

$$\begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \\ B_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & 0 & -\sin \theta_0 \\ -\sin \phi_0 \sin \theta_0 & \cos \phi_0 & -\sin \phi_0 \cos \theta_0 \\ \cos \phi_0 \sin \theta_0 & \sin \phi_0 & \cos \phi_0 \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{0x} \\ B_{0y} \\ B_{0z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

将 (1)式简记为  $B_1 = A_0 B_0$ 。假设某地的地磁场为

$$B_0 = \begin{bmatrix} 20000 \\ 26000 \\ 35000 \end{bmatrix} \text{ nT, 根据 (1)式有: 当 } \theta_0 = 0.3^\circ; \phi_0 = 0^\circ$$

$$\text{时, 传感器输出为 } B_1 = \begin{bmatrix} 19816 \\ 26000 \\ 35104 \end{bmatrix} \text{ nT; 当 } \theta_0 = 0^\circ;$$

$$\phi_0 = 0.3^\circ \text{ 时, 传感器输出为 } B_1 = \begin{bmatrix} 20000 \\ 25816 \\ 35136 \end{bmatrix} \text{ nT. 因此,}$$

可以得出结论:如果不水平度大于  $0.3^\circ$ ;传感器输出矢量的各分量的测量误差将在  $100\text{nT}$ 以上。这样大的误差,在精确测量中必须进行修正。

对于具体的磁传感器,如果能找到一组水平修正参数  $\theta_0, \phi_0$ ,那么将 (1)式转化为  $B = A^{-1} B_1$  ( $A$ 表示用  $\theta_0, \phi_0$ 取代  $\theta_0, \phi_0$ 时的  $A_0$ ),即可由传感器输出计算出修正后的磁场测量值为:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \phi_0 \sin \theta_0 & \cos \phi_0 \sin \theta_0 \\ 0 & \cos \phi_0 & \sin \phi_0 \\ -\sin \theta_0 & -\sin \phi_0 \cos \theta_0 & \cos \phi_0 \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \\ B_{1z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

这样,对三分量磁通门传感器的水平修正,关键就是

计算出一组  $\theta_0, \phi_0$ ,使其充分接近  $\theta_0, \phi_0$ 。

### 1.2 共轭梯度优化方法

调整三分量磁传感器基座为水平,使传感器绕其  $Z$ 轴旋转,记录  $N$ 个输出  $B_1^{[1]}, B_1^{[2]}, \dots, B_1^{[N]}$ ,由 (2)式可得  $N$ 经过  $\theta_0, \phi_0$ 修正了的输出  $B^{[1]}, B^{[2]}, \dots, B^{[N]}$ 。这样,  $B$ 可以看作  $\theta_0, \phi_0$ 的函数,即  $B = f(\theta_0, \phi_0)$ 。当磁传感器所在位置磁场恒定时,准确的水平修正参数应使  $B$ 的垂直分量的向量范数  $B_z$ 恒定不变。因此,最优的  $\theta_0, \phi_0$ 必定使得  $B_z^{[1]}, B_z^{[2]}, \dots, B_z^{[N]}$ 间的差别最小,利用这个特点可以求出两个角度参数。所以,水平修正参数的求解可以归结为下面的最优化问题:

$$\begin{aligned} (\theta_0, \phi_0)_{opt} &= \min [f(X)] \\ &= \min \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_z^{[i]} - \overline{B_z})^2 \right] \quad (3) \\ \overline{B_z} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_z^{[i]} \end{aligned}$$

当  $f(X) = 0$ 时,有  $B_z^{[i]} = \overline{B_z}$ 。也就是说,无论  $N$ 值取多大,  $B_z^{[1]}, B_z^{[2]}, \dots, B_z^{[N]}$ 都相等。并且,它们都应等于环境磁场的垂直分量。因为,三轴正交的磁通门传感器任意摆放姿态时的输出总量都等于地磁场总量,所以  $B$ 的水平分量也等于环境地磁场的水平分量。那么,  $B$ 矢量应与地磁场矢量相等,即  $B = B_0$ 。根据 (1)、(2)两式,  $B = A^{-1} A_0 B_0$ 。若要  $B = B_0$ ,那么  $A^{-1} A = E$  ( $E$ 为单位矩阵)。根据逆矩阵的唯一性<sup>[4]</sup>有  $A = A_0$ ,即:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_0 & 0 & -\sin \theta_0 \\ -\sin \phi_0 \sin \theta_0 & \cos \phi_0 & -\sin \phi_0 \cos \theta_0 \\ \cos \phi_0 \sin \theta_0 & \sin \phi_0 & \cos \phi_0 \cos \theta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & 0 & -\sin \theta_0 \\ -\sin \phi_0 \sin \theta_0 & \cos \phi_0 & -\sin \phi_0 \cos \theta_0 \\ \cos \phi_0 \sin \theta_0 & \sin \phi_0 & \cos \phi_0 \cos \theta_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于正弦函数在  $(-90^\circ, 90^\circ)$ 区间内是单调的,通常情况下,三分量磁通门传感器的水平误差角满足  $-1^\circ < \theta_0, \phi_0 < 1^\circ$ 。所以,由 (4)式可以得出结论:目标函数在定义域内的极值是唯一的。

共轭梯度优化方法<sup>[5]</sup>的具体步骤为:

- (1)给定:初始点  $X_0 = (\theta_0, \phi_0)$ ,迭代终止条件  $\epsilon$ ;
- (2) $k=0$ 时,求取目标函数的梯度  $\nabla f(X_k)$ ,令  $S_k = \nabla f(X_k)$ ;

$$(3) \text{选取迭代步长 } p_k = \begin{bmatrix} -\frac{a}{k^{\rho_1}} & 0 \\ 0 & \frac{b}{k^{\rho_2}} \end{bmatrix}, \text{其中 } a, b \text{ 及}$$

$\rho_1, \rho_2$  为可选参数;

(4)取新的迭代点  $X_{k+1} = X_k + S_k p_k$ ;

(5)判断  $\|\nabla f(X_{k+1})\| \leq \epsilon$ , 如果满足条件则终止迭代,取  $X_{k+1}$  为搜索结果。如果不满足条件,进行 (6);

(6)计算  $\nu_k = \|\nabla f(X_{k+1})\|^2 / \|\nabla f(X_k)\|^2$ , 新的迭代方向  $S_{k+1} = -\nabla f(X_{k+1}) + \nu_k S_k$ , 并令  $k = k + 1$ , 重复 (3) ~ (5)。

采用传统的方法获得迭代步长  $p_k$ , 需要一个复杂函数的极值, 将占用大量计算时间。经过实验总结出了如第 (3) 步中选取迭代步长的经验方法。其中, 参数  $a, b$  及  $\rho_1, \rho_2$  的选取原则是:

$a, b$  的不同取值, 将分别对  $\theta, \phi$  的前期搜索速度造成直接影响。在保证优化过程收敛的前提下,  $a, b$  的值尽可能取得较大, 这样可提高前期搜索速度;

调整  $\rho_1, \rho_2$  的取值可以控制  $\theta, \phi$  的后期搜索。 $\rho_1, \rho_2$  的取值应尽可能小, 以提高后期收敛速度, 但  $\rho_1, \rho_2$  取过小的值时会造成后期搜索不收敛。

## 2 实验

### 2.1 正交修正

三分量磁通门传感器的水平修正以传感器的测量坐标系完全正交为前提的, 所以, 进行水平修正前必须对传感器进行正交修正。为此, 首先对某型三分量磁通门传感器进行正交修正。

在相对稳定的地磁场环境下, 任意改变传感器安放姿态, 记录 20 个传感器输出 (见表 1)。

利用参考文献 [2] 提出的共轭次梯度法对不正交参数进行搜索。得到正交修正参数为  $X = (0.5974, -0.7875, -0.1035)$ 。利用这一正交修正参数, 对表 1 中的磁场数据进行正交修正, 修正后的磁场总量较修正前变化情况如图 2 所示。

从图中可以看出, 经过正交修正后, 磁场总量的振荡幅度明显减小, 说明传感器三轴不正交的状况得到了很好的改善。

### 2.2 水平修正

保持三分量磁通门传感器基座水平, 连续旋转传感器一周, 记录 30 个传感器输出 (见表 2)。

将表 2 中的磁场三分量测量数据, 利用 2.1 得到的正交修正参数进行正交修正后, 再进行水平修正参数的优化搜索, 搜索过程见图 3。

表 1 正交修正实验数据

磁场分量	传感器输出数据 (单位: nT)									
Bx	-21080	-25972	18225	-4057	32098	33091	21058	38804	38208	-19481
By	27249	-23793	-29914	33946	11622	-9688	-4226	9608	2468	11665
Bz	35086	34965	34843	35104	34983	34925	44140	28123	30468	43686
Bx	-25479	-28642	-28128	-6488	34222	21719	-20427	-31516	-35774	9284
By	26831	1705	-13388	-35752	1474	33112	19858	12711	-18487	-39404
Bz	32454	40217	38520	33815	34976	28587	40104	35780	29040	28616

表 2 水平修正实验数据

磁场分量	传感器输出数据 (单位: nT)									
Bx	31203	33076	22228	18169	13657	9453	6921	2371	-4924	-10649
By	-12679	4941	25006	28151	30665	32279	32956	33668	33522	32277
Bz	35483	35464	35371	35344	35316	35290	35275	35249	35210	35180
Bx	-15164	-21072	-26697	-32173	-34545	-32287	-28583	-24664	-19969	-15116
By	30516	26936	21582	12418	-2807	-12782	-19753	-24464	-28395	-31206
Bz	35158	35133	35110	35095	35109	35137	35168	35197	35228	35260
Bx	-10548	-3823	519	5400	10224	14707	20538	25907	31230	31203
By	-32981	-34326	-34468	-33961	-32734	-30870	-27155	-21841	-12596	-12679
Bz	35288	35326	35350	35375	35400	35421	35448	35469	35484	35483

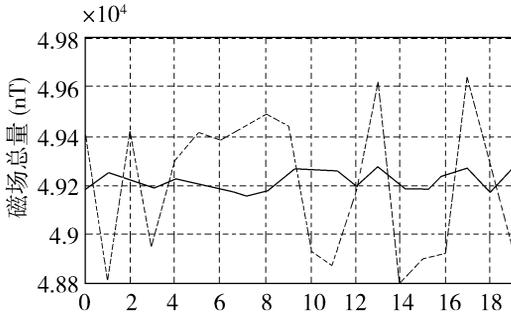


图 2 正交修正前后磁场总量

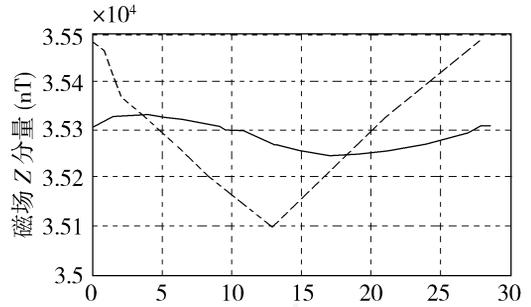


图 4 水平修正前后磁场 Z分量

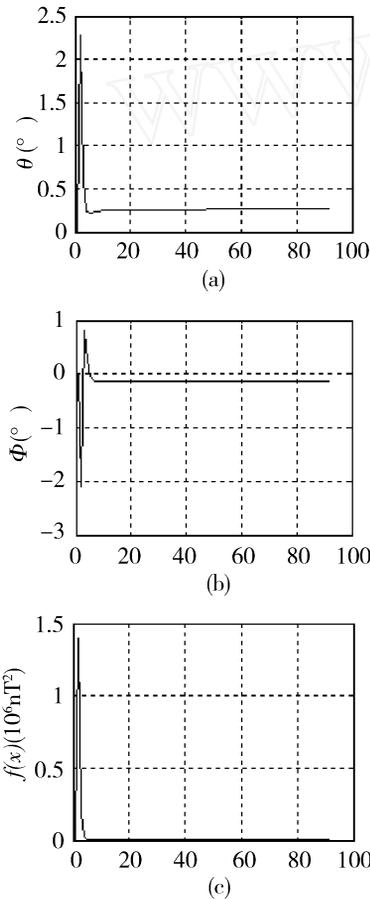


图 3 水平修正参数优化搜索实验

搜索结果为  $X = (0.2625, -0.1440)$ 。利用得到的水平修正参数,对经过正交修正后的表 2 中的磁场三分量数据进行水平修正,修正后磁场 Z 分量较修正前的变化情况如图 4 所示。

### 3 结 论

在实际应用中,采用文献 [2] 提出的方法,对三分量磁通门传感器正交修正参数进行搜索,搜索过程具有较高的效率,搜索结果具有较好的可重复性。

经过修正后,由于三轴不正交给磁场总量带来的测量误差得到显著改善,震荡幅度由修正前的 400nT 减小到 50nT,能够满足水平修正所需精度。

为了修正三分量磁通门传感器坐标参考系不水平的问题,提出的求解水平修正参数的共轭梯度优化方法,具有目标函数结构简单,在定义域内有全局最优解的特点。其中,采用矩阵形式选取搜索步长的做法,较传统方法既节省运算时间,又能保证前期搜索的高效性和后期搜索的收敛性。实验证明,该种修正方法能够很好地消除由于坐标参考系不水平给测量带来的误差,三分量磁通门传感器的垂直分量振荡幅度由修正前的 200nT 减小到 50nT。

#### 参考文献:

- [1] 林春生. 舰船磁场信号检测与磁性目标定位 [M]. 武汉:海军工程大学出版社, 1996, 59 ~ 60.
- [2] 胡海滨,林春生,龚沈光. 基于共轭次梯度法的非理想正交三轴磁传感器的修正 [J]. 数据采集与处理, 2003, 13 (1): 88 ~ 91.
- [3] Lassahn M P, Trenkler G. Vectorial Calibration of 3D Magnetic Field Sensor Arrays[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Apr 1995, 44 (2): 470 ~ 471.
- [4] 姚孟臣. 线性代数、概率统计 [M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [5] 赵松年,佟杰新,卢秀春等. 现代设计方法 [M]. 北京:机械工业出版社, 1996, 47 ~ 50.

#### 作者简介:



闫 辉: 1978 年出生,毕业于海军工程大学信息与电气工程学院导航与制导工程专业。目前,主要从事地球磁场测量工作与舰船磁防护理论研究。