第 33 卷 第 5 期 电 子 科 技 大 学 学 报 Vol.33 No.5
2004 年 10 月 Journal of UEST of China Oct. 2004

磁罗盘的罗差分析与验证

杨新勇[1]， 黄圣国[2]

(1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 210016; 2. 南京航空航天大学民航学院 南京 210016)

【摘要】针对基于最佳椭圆拟合的磁罗盘误差补偿算法，设计了一组模拟不同类型干扰磁场的数据采集与罗差分析实验。通过对磁罗盘在各种干扰磁场下表征测量数据特性的拟合椭圆参数与最终补偿效果的详细分析，对理论公式进行了比照与补充，同时探讨了软铁干扰磁场与硬铁干扰磁场的相互作用关系以及在综合磁航向误差中各自所产生的影响。

关 键 词 磁罗盘; 罗差; 最佳椭圆拟合; 误差补偿

中图分类号 V241.611; TP368.1 **文献标识码** A

Magnetic Deviation Analysis and Verification for Magnetic Compass

Yang Xinyong[1]，Huang Shengguo[2]

(1. College of Automation Engineering , Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016；
2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016)

Abstract In this paper, a set of data collection and magnetic deviation analysis experiments which can simulate different magnetic disturbances are designed based on ellipse-specific fitting error compensation method. Under the condition of diverse magnetic disturbances, ellipse parameter which depict measured data characteristic and the last compensation effect are analyzed in detail. Theoretics expressions are compared and complemented with experiment results. At the same time, the interaction of soft iron and hard iron distortion and the role of each in the whole magnetic heading error are discussed.

Key words magnetic compass; magnetic deviation; ellipse-specific fitting method; error compensation

作为一种航向测量装置，磁罗盘根据地磁原理计算磁航向角。导致磁罗盘航向误差的因素很多，如磁传感器的安装误差，磁罗盘装置本身存在的数据采集与转换误差(统称为电器误差)，多轴磁传感器存在的非正交误差，干扰磁场引起的磁罗差等。对于安装误差，电器误差，非正交误差，可通过改善设计、制造安装工艺等措施来消除或削弱其对磁罗盘输出航向精度的影响。当磁罗盘安装在载体上后，对磁罗盘航向精度影响最大同时也是最难以控制的是磁罗差。

如何实时有效地消除或尽量减小外界干扰磁场对磁罗盘航向精度的影响，是保证磁罗盘能够广泛应用的关键所在。当磁罗盘应用到城市车辆导航系统等场合，车辆行经高层建筑物，钢铁桥梁，铁路道口时，磁罗盘周围的磁场强度分布都可能发生变化，影响磁罗盘的航向精度[1]。

本文在理论分析的基础上，结合一种具体的实用补偿算法，通过模拟不同干扰状态下的磁场强度分布，对实验结果与理论公式进行了对比分析。

1 罗差分析

无磁场干扰时，对于两轴磁传感器(X，Y)，当其在水平面旋转时，理想的输出(Xh–Yh)应为一圆心位于

收稿日期：2003 –04–07
作者简介：杨新勇(1973–)，男，博士生，主要从事计算机测控，数字信号处理方面的研究.

原点的正圆。干扰磁场由硬铁磁场与软铁磁场两部分组成。硬铁磁场由磁罗盘平台(可认为是载体)上的永久性磁铁和被磁化的钢铁物质组成，其特点是当载体位于某一固定位置时，其强度为一定值，不随航向的变化而变化，在输出数据(Xh–Yh)中表现为固定偏移量。软铁磁场可认为由地球磁场与磁罗盘周围的磁化物质相互作用而产生。与硬铁磁场不同的是，软铁磁场强度的大小与方向与磁罗盘的方位有关[2]。

假设软铁磁场(包括地球磁场与载体相互作用后的综合磁场)在水平面坐标轴投影为S_x, S_y, S_z(以磁北方向为X轴，采用东北地坐标系)。硬铁磁场在三轴磁传感器的坐标分量为H_x, H_y, H_z。当载体的航向角为y，倾斜角为(q, g)时，推导综合磁场强度在水平面的投影：

1) 软铁磁场在航向角为y，传感器水平放置时在三轴磁传感器上的投影分量为

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos y & \sin y & 0 \\ -\sin y & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \tag{1}$$

2) 当传感器倾斜角为(q, g)时磁传感器测量值$[MAGX, MAGY, MAGZ]^T$在水平面的投影分量为

$$\begin{bmatrix} \overline{M}x \\ \overline{M}y \\ \overline{M}z \end{bmatrix} = \boldsymbol{C} \begin{bmatrix} MAGX \\ MAGY \\ MAGZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} + \boldsymbol{C} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos y & \sin y & 0 \\ -\sin y & \cos y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} + \boldsymbol{C} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{C}$为坐标转换矩阵，其值为：

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \cos q & \sin q \sin g & \sin q \cos g \\ 0 & \cos g & -\sin g \\ -\sin q & \cos q \sin g & \cos q \cos g \end{bmatrix} \tag{3}$$

3) 该时刻载体的磁航向角

$$y = \arctan\left|(\overline{M}x - \overline{M}y)/(\overline{M}x + \overline{M}y)\right| \tag{4}$$

2 磁干扰实验及数据分析

2.1 实验方案设计

假设磁罗盘倾斜角度保持固定不变，同时对罗差以外的其他误差因素不予考虑，从式(2)可以看出，即使载体的位置及航向角发生了变化，如果软铁磁场，硬铁磁场强度的大小和方向能够维持恒定，则当载体在原地旋转一周后，其测量数据在水平面的投影分量应服从圆心为$\boldsymbol{C}[H_x, H_y]^T$，半径$R^2 = S_x^2 + S_y^2$的正圆分布，但实际情况并非如此。为此，本文针对一种基于最佳椭圆拟合的磁罗盘误差补偿算法，设计了一组相关实验，以期通过模拟不同干扰情况下磁罗盘测量数据的变化以及由于干扰源的不同而产生的磁航向误差变化，达到分析软硬铁磁场之间的交互作用以及各自对磁航向误差造成的影响，并检验该补偿算法适用范围之目的。其工作原理如下：

使磁罗盘在环境磁场中均匀旋转一周(360°)，微控制器按一定的采样频率同步采集原始磁场强度数据并计算磁场强度水平分量。对水平面内磁场强度分量进行最佳椭圆拟合，可得到表征椭圆拟合函数的5个参数$[C_x, C_y, R_x, R_y, j]$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos j & -\sin j \\ \sin j & \cos j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x \cos f \\ R_y \sin f \end{bmatrix} \tag{5}$$

$(\overline{M}x, \overline{M}y)$通过坐标变换，映射为正圆坐标$(\overline{M}'x, \overline{M}'y)$。式(7)为补偿后的航向角表达式。

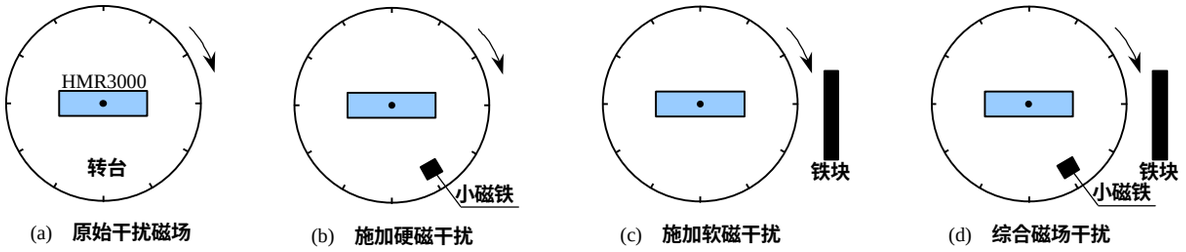
$$\begin{bmatrix} \overline{M}x \\ \overline{M}y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos j & -\sin j \\ \sin j & \cos j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/X_{sf} & 0 \\ 0 & 1/Y_{sf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{M}'x \\ \overline{M}'y \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$y = \arctan\left|\overline{M}'y / \overline{M}'x\right| + j \tag{7}$$

式中 标度系数

$$X_{sf} = \max(1, R_y / R_x), Y_{sf} = \max(1, R_x / R_y) \tag{8}$$

为研究方便，主要考虑水平状态下($q=0, g=0$)干扰磁场的变化及由此产生的航向角的变化情况。将三轴磁阻传感器(HMR3000)固定在无磁三轴转台上并调整工作台面水平，采用基于最佳椭圆拟合的误差补偿算法及操作步骤，在实验室条件下，对于如图1所示的不同类型的模拟干扰磁场，均做了多次重复实验。



(a) 原始干扰磁场　(b) 施加硬磁干扰　(c) 施加软磁干扰　(d) 综合磁场干扰

图1　实验设计方案

2.2　数据采集与误差补偿

在实验室条件下，不施加任何人为干扰磁场，多次重复实验都得到了相似的拟合椭圆参数，证明了最佳椭圆拟合算法的有效性与可靠性。其拟合椭圆参数与补偿后的磁航向误差如表1与图2所示。需要说明的是：无人为干扰磁场仅仅意味着相对地球原始磁场强度而言，自然条件下的干扰磁场对磁传感器的影响相对较弱。另外，由于存在安装误差，假设在此种情况下经最佳椭圆拟合补偿后的零航向角为真实零度，下面的实验结果均以本次实验测得的零点为零基准。

表1　施以不同干扰源后测量数据的椭圆拟合结果

	C_x/ ×10^{-4}T	C_y/ ×10^{-4}T	R_x/ ×10^{-4}T	R_y/ ×10^{-4}T	j /rad
原始磁场	–287.8	–310.8	6 497.2	6 427.7	0.7
硬铁磁场(1)	480.8	5 734.0	6 491.1	6 436.9	–0.2
硬铁磁场(2)	4 665.3	–1 940.8	6 494.4	6 434.3	0.6
软铁磁场(1)	–261.7	–72.1	7 140.4	7 083.2	0.9
软铁磁场(2)	–104.0	558.5	6 550.9	6 218.3	0.3
综合磁场	–627.8	5 847.4	7 196.0	7 246.8	0.8

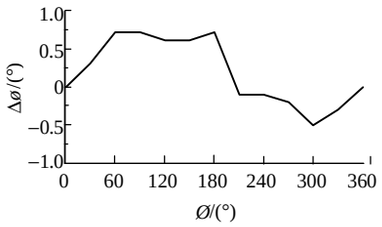


图 2　原始磁场补偿后的航向误差

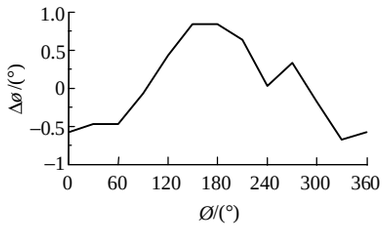


图 3　硬磁干扰补偿后的航向误差

将一小块永久磁铁固定在转台上，转台旋转过程中，磁铁与磁传感器的相对位置始终保持不变。因此，该情况下的干扰磁场可认为是硬磁干扰。改变磁铁在转台上的位置后，又做了多次采样补偿实验。图3所示为其中一次的补偿结果。软铁干扰磁场的改变可通过在转台附近安放一铁块来模拟。转台旋转过程中，铁块与转台的相对位置保持不变。图4所示为某次补偿结果。同理，综合干扰磁场(软铁，硬铁磁场共存)条件下的补偿结果如图5所示。

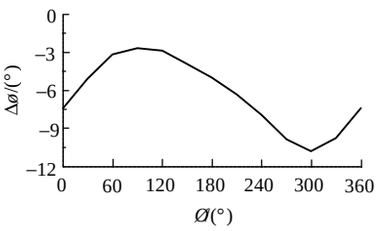


图4　软磁干扰补偿后的航向误差

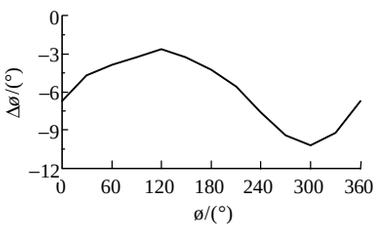


图 5　综合磁场干扰补偿后的航向误差

2.3 磁场干扰误差分析

由图2可以看出，自然条件下，采用基于最佳椭圆拟合的磁罗盘误差补偿算法，补偿后的航向精度可稳定在±1°，补偿效果非常明显。人为施加硬磁干扰，并调整干扰源距磁罗盘的相对位置，以使在不同的采样过程中，硬磁干扰发生改变，多次实验结果均表明：经椭圆拟合补偿后的航向精度依然可维持在较高水平，如图3所示。然而，施加软磁干扰以及软磁干扰变化时的补偿效果与硬磁干扰相比，情况有很大的不同，如图4所示。主要表现为：

1) 零点偏移量较大且不为定值，当干扰发生变化时，零点偏移亦随之改变；

2) 相对误差增大，相对误差的改变量在某些时候可能大于10°。但基本表现为正弦关系。综合干扰磁场作用下的补偿效果与软磁干扰类似，如图5所示。

表1的第1行为原始磁场作用下的拟合椭圆参数。即使是在自然条件下，磁传感器旋转一周后的磁场强度水平投影分量也无法严格落在圆心位于原点的正圆上。但能够保证软硬铁磁场干扰的强度都很微弱。且椭圆长短半轴差值不大。表1的第2，3行分别对应硬磁干扰变化时，两次测量数据的椭圆拟合参数。很明显，硬磁干扰的变化仅仅改变椭圆的偏心量，而对椭圆长短半轴的大小，则影响甚微。即便是磁传感器承受很强的硬磁干扰，致使椭圆圆心严重偏离座标原点(480.8, 5 734.0)，而对应的长短半轴长度与自然条件下相比，却差别不大。该特性与式(2)所描述的非常吻合，即硬磁干扰为一常量，与航向无关。然而，由表1第4，5行可以看出，软磁干扰的作用比较复杂，不仅导致椭圆长短半轴长度发生了变化，亦会影响到椭圆的圆心偏移量，即在软磁干扰作用下，椭圆圆心偏移实为软硬磁共同作用的结果。

由此可以判断，无论是自然磁干扰或是较强的硬磁干扰，硬磁在磁罗盘测量数据中均表现为一定值，与磁罗盘的航向无关。同时，如果弱软磁干扰对地磁场强度和磁力线方向的影响很小，可保证补偿后的航向精度。而对于较强的软磁干扰，罗盘在采样旋转过程中，不同航向位置对应的软磁矢量强度与方向均可能发生变化。虽然在统计意义上，旋转一周后的磁场强度坐标依然为一椭圆，但经过椭圆－正圆映射与坐标转换后，所得结果仅有可能补偿了部分硬软磁矢量强度，而对软磁矢量方向(即磁力线)的补偿却无能为力。同样，综合磁场作用下的情况亦是如此。

3 结 论

通过上面理论推导，并结合实验误差分析，可得到下面结论：

1) 软磁干扰作用较弱时，基于最佳椭圆拟合的误差补偿算法具有很好的补偿效果，能够有效地消除硬磁干扰对磁航向的影响。同时，补偿后的航向具有较低的绝对误差与相对误差。

2) 软磁干扰的引入，使载体所处的外界磁场发生变化，且磁力线分布较复杂，上述补偿算法或类似算法的有效性会大打折扣。

3) 该方法比较适合应用在软磁作用较小的场合，如飞机，舰船等。而在车辆导航定位系统等场合，该方法的实用性较低。

参 考 文 献

[1] Abbott E, Powell D. Land-vehicle navigation using GPS[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(1): 145-162

[2] Caruso M J. Application of magneto resistive sensors in navigation systems[J]. Sensors and Actuators, 1997, 42(9): 15-21

编 辑 漆 蓉