磁通门磁罗经的误差分析与补偿方法研究

海军潜艇学院　徐冠雷　吉春生　葛德宏　方永华

[内容提要]此文给出了磁通门磁罗经主要误差的简化模型分析，并基于这种分析讨论了误差的自动补偿方法。经过试验与仿真分析，系统补偿后的精度有很大的提高，并具有体积小、结构简单、反应快和可靠性高等优点。

关键词：磁罗经　磁通门　误差补偿

中图分类号：U666　**文献标识码**：A

The research of error model and error auto-compensation of fluxgate compass system

Abstract: This paper presents the error model analysis of magnetic heading system consisted of two fluxgate magnetometers and a single-chip microcomputer, and gives the compensation as well. Test and experiment proves that it has higher preision, when compared to gyro compass, is smaller in size, lighter in weight, simpler in contruction and more reliable.

Key words: compass; magnet fluxgate; error compensation

1　前言

磁罗经是目前舰船指向仪器中的一种，由于精度不高只作为辅助指向仪器使用，但由于其结构简单、尺寸小、反应快、可靠性高以及成本低等优点仍然在舰船导航仪器中占有重要的地位[1][2]。特别是当其它指向仪器发生故障后，这时磁罗经便成为舰船上唯一的指向仪器。因此，它的精度的高低与航向的准确性尤为重要。本文将给出一种磁通门磁罗经系统主要误差的模型分析，并基于这种分析给出误差自动测定和补偿的方法，可以提高精度。

磁通门磁罗经系统主要有以下几部分构成：两个磁通门传感器，一个模数转换器(A/D)和一个单片机系统(见图1)。其中两个传感器分别测量X轴与Y轴上的地磁场强度，且两轴在水平面内正交，X轴水平指向舰船的艏向，Y轴水平指向舰船的右舷，两个传感器的数据经过A/D转换后传到单片机系统进行处理，从而得到最后的航向信息。

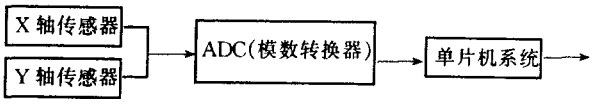

图1

假设两个传感器的输出分别为Hx和Hy，则理想情况下，传感器所测合成磁场矢量即为地磁分量。磁北向的矢量：

$$\vec{H}=iH_x+jH_y \qquad (1)$$

则由图2与式(1)，经过计算可以得到磁航向MC。

令 $\Psi=arc\sin\frac{|H_y|}{\sqrt{H_x^2+H_y^2}}$　(2)

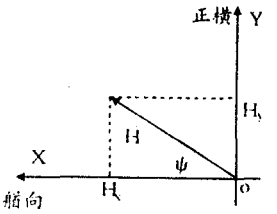

图2

那么有

$$MC=\begin{cases}360^\circ-\Psi & H_x\geqslant 0,H_y\geqslant 0\\ \Psi & H_x\geqslant 0,H_y<0\\ 180^\circ+\Psi & H_x<0,H_y\geqslant 0\\ 180^\circ-\Psi & H_x<0,H_y<0\end{cases} \qquad (3)$$

但实际使用中，由于各种误差的影响，磁通门罗经的指示航向并非磁航向，而是含有一定误差的罗航向。下面，就磁通门罗经的误差产生原因进行讨论。

2　磁通门罗经误差分析与补偿

2.1　误差分析

磁通门磁罗经误差主要由仪器误差和自差构成。仪器误差主要包括质构误差(包括电路误差、材料误差、结构误差等)、标度因子不匹配、传感器不正交、传感器不水平、基线误差；由于自差较大且有独立的校正装置可以进行单独校正，本文仅讨论自差校正后的剩余自差。以上各种误差除了剩余自差外其余均可认为是仪器误差。设 $\vec{H}=iH_x+jH_y$ 为传感器测量得到的合成磁场，而 $\vec{H_t}=iH_{tx}+jH_{ty}$ 为地磁水平分量，那么测量误差是：

$$\triangle\vec{H}=\vec{H}-\vec{H_t} \qquad (4)$$

或者 $\begin{cases}\triangle H_x=H_x-H_{tx}\\ \triangle H_y=H_y-H_{ty}\end{cases}$　(5)

设MC是磁航向，CC为罗航向，则航向误差△C为：

$$\triangle C=MC-CC \qquad (6)$$

所以，(3)式可写为如下形式：

$$MC=\begin{cases}360^\circ-\Psi_t & H_x\geqslant 0,H_y\geqslant 0\\ \Psi_t & H_x\geqslant 0,H_y<0\\ 180^\circ+\Psi_t & H_x<0,H_y\geqslant 0\\ 180^\circ-\Psi_t & H_x<0,H_y<0\end{cases} \qquad (7)$$

其中 $\Psi_t=arc\sin\frac{|H_{tY}|}{\sqrt{H_{tx}^2+H_{ty}^2}}$

根据微分则有以下式子成立：

$$\triangle C=\frac{\partial CC}{\partial H_x}\triangle H_x+\frac{\partial CC}{\partial H_y}\triangle H_y \qquad (8)$$

由式(2)与(3)得：

$$\frac{\partial CC}{\partial H_x}=\begin{cases}\frac{\partial}{\partial H_x}arcsin\frac{|H_y|}{\sqrt{H_x^2+H_y^2}} & Hx\cdot Hy\geqslant 0\\ \frac{\partial}{\partial H_x}arcsin\frac{|H_y|}{\sqrt{H_x^2+H_y^2}} & Hx\cdot Hy\leqslant 0\end{cases} \qquad (9)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

注意到

$$\frac{H_x}{\sqrt{H_x^2}}=\begin{cases}1 & H_x>0\\ -1 & H_x<0\end{cases}$$

从而(9)式变化为

$$\frac{\partial CC}{\partial H_x}=-\frac{H_y}{H_x^2+H_y^2} \tag{10}$$

同理可得：

$$\frac{\partial CC}{\partial H_y}=\frac{H_x}{H_x^2+H_y^2} \tag{11}$$

所以(6)可整理为

$$\triangle C=\frac{1}{H_x^2+H_y^2}(H_x\triangle H_y-H_y\triangle H_x) \tag{12}$$

上式就是基本的测量过程的误差方程，下面就每个误差源进行一一分析。

2.1.1　传感器质构误差

传感器质构误差就是传感器输出时的仪器自身误差(包括电路误差、材料误差、结构误差等，与传感器的制作工艺有关，在制作完成后误差便基本固定[1])，由于误差变化率很小可以视为一个常值。设两个传感器自身误差分别为：

$$\begin{cases}\triangle H_x=P_x\\ \triangle H_y=P_y\end{cases} \tag{13}$$

2.1.2　标度因子不匹配误差

应用式子(2)与(3)进行航向的确定，必须要求两个传感器有相同的参数或匹配的标度因子。任何不匹配的参数都会导致误差的产生。假定X轴传感器的标度因子为正常数值设为1，那么Y轴传感器标度因子值为$1+\triangle k$，$\triangle k$为不匹配度，那么有

$$\begin{cases}\triangle H_x=0\\ \triangle H_y=\triangle kH_y\end{cases} \tag{14}$$

2.1.3　非正交性误差

见图3，X与Y是理想情况下的两轴（夹角为90°)，而实际上两个传感器的指向分别为X1和Y1，与X和Y轴向的夹角分别为α和β，则非正交的两轴将会产生如下的误差：

$$\begin{cases}\triangle H_x=H_x(\cos\beta-1)+H_y\sin\alpha\\ \triangle H_y=H_y(\cos\alpha-1)+H_x\sin\beta\end{cases} \tag{15}$$

2.1.4　传感器非水平误差

设θ和γ分别为两个传感器方向X_1与Y_1和水平面的夹角(见图4，其中Z轴垂直指向水平面)，则此时

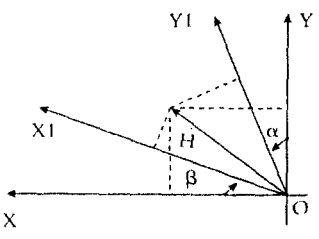

图3

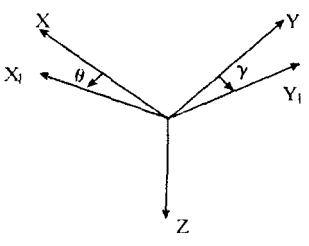

图4

测量磁场中的误差为

$$\begin{cases}\triangle H_x=H_x(\cos\theta-1)+H_z\sin\theta\\ \triangle H_y=H_y(\cos\gamma-1)+H_z\sin\gamma\end{cases} \tag{16}$$

2.1.5　基线误差

当传感器偏离基线所造成的误差称之为基线误差。由于基线误差比较小，同时一旦在仪器安装后便固定，因此误差可以有以下形式：

$$\begin{cases}\triangle H_x=S_x\\ \triangle H_y=S_y\end{cases} \tag{17}$$

因此，基于以上分析，总的仪器误差可以由式(13)、(14)、(15)、(16)和(17)获得，得到下式：

$$\begin{cases}\triangle H_x=(P_x+S_x+H_z\sin\theta)+Hx(cox\theta+\\ \qquad\cos\beta-2)H_y\sin\alpha\\ \triangle H_y=(P_y+S_y+H_z\sin\gamma)+Hy(cox\gamma+\cos\alpha\\ \qquad-2+\triangle K)+H_x\sin\beta\end{cases} \tag{18}$$

上式右边由三部分组成，即常数项、(单轴）独立项和(双轴)相关项。由于H_z是个常数，因此被划分到常数项中。设：

$$\begin{cases}C_x=P_x+S_x+H_z\sin\theta\\ C_y=P_y+S_y+H_z\sin\theta\\ D_x=\cos\theta+\cos\beta-2\\ D_y=\cos\gamma+\cos\alpha-2+\triangle K\\ E_x=\sin\alpha\\ E_y=\sin\beta\end{cases} \tag{19}$$

由于系统安装在水平环上，水平误差很小可以忽略，(19)式又可以写成如下形式：

$$\begin{cases}C_x=P_x+S_x\\ C_y=P_y+S_y\\ D_x=\cos\beta-1\\ D_y=\cos\alpha-1+\triangle K\\ E_x=\sin\alpha\\ E_y=\sin\beta\end{cases} \tag{19}$$

那么(16)式即可写成如下形式：

$$\begin{cases}\triangle H_x=C_x+D_xH_x+E_xH_y\\ \triangle H_y=C_y+D_yH_y+E_yH_x\end{cases} \tag{20}$$

将以上各式化简并整理得总的仪器误差：

$$\delta_y=P_1+P_2\sin\Phi+P_3\cos\Phi+P_4\sin2\Phi+P_5\cos2\Phi \tag{21}$$

其中，Φ为与仪器误差相关的航向值，且有

$$\begin{cases}P_1=\frac{1}{2}(E_x-E_y)\\ P_2=\frac{-C_y}{\sqrt{H_x^2+H_y^2}}\\ P_3=\frac{C_x}{\sqrt{H_x^2+H_y^2}}\\ P_4=\frac{1}{2}(D_x-D_y)\\ P_5=\frac{1}{2}(E_x+E_y)\end{cases} \tag{22}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式(21)便是总的仪器误差方程式。

2.1.6　罗经剩余自差

磁通门罗经自差是由于罗经传感器周围除了大地磁场外还存在其他的磁场所致，主要受舰船钢铁本身所产生的软硬铁磁力影响，有时这种自差可达十几度甚至几十度。由于罗经上有自差消除装置可用，因此，本文只讨论自差消除后的剩余自差，即：

$$\delta = A + B\sin CC + C\cos CC + D\sin 2CC + E\cos 2CC \quad (23)$$

其中，A 是固定自差系数，B、C 是半圆自差系数，D、E 为象限自差系数；CC 是罗航向。

2.1.7　罗经误差

由于式(20)与式(22)有相同的形式，而且大多数情况下，罗经剩余误差一般较小，因此 Φ 可以用 CC 近似代替。由式(20)与式(22)可以得到总的磁罗经误差

$$\triangle E_r = \delta_y + \delta$$

$$\triangle E_r = R_1 + R_2 \sin CC + R_3 \cos CC + R_4 \sin 2CC + R_5 2CC \quad (24)$$

其中：$R_i = P_i + Q_i \quad i = 1, 2, \cdots 5$

$$Q_1 = A, Q_2 = B, Q_3 = C, Q_4 = D, Q_5 = E$$

因此，由(24)式可以看出，只要通过求解出 R_i(i = 1, 2, 3, 4, 5)，便可以得到各航向 CC 的磁罗经误差。

2.2　磁通门罗经误差的自动测定

2.2.1　匀速旋回法误差自动测定[4][5]

舰船旋回一周航向改变 360°，用时设为 t_{360}，则舰船旋回的角速度为：

$$\omega = 360/t_{360} \quad (25)$$

现操纵舰船使其由位置 A 顺时针旋回到 B 点（见图 5），磁罗经航向变化：

$$\triangle CC_i = CC_i - CC_0 \quad (26)$$

若磁罗经航向变化 $\triangle CC_i$ 时的用时为 $\triangle t_i$，而舰船的航向实际变化量为：

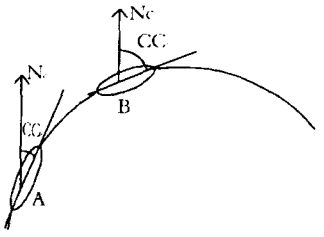

图 5

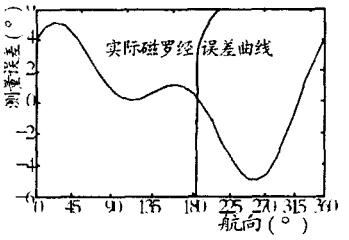

图 6

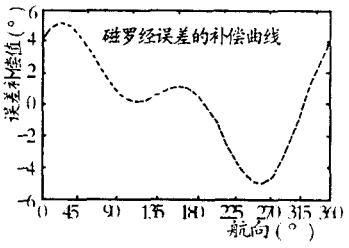

图 7

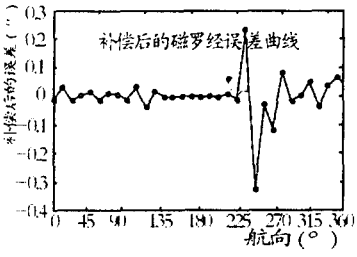

图 8

$$\triangle MC_i = \omega \cdot \triangle t_i = 360 \cdot \frac{\triangle t_i}{t_{360}} \quad (27)$$

故舰船由位置 A 旋回到位置 B 时的误差变化量为：

$$\triangle \delta_i = \triangle MC_i - \triangle CC_i \quad (28)$$

如果舰船在起始点 A 航向 CC_0 上的误差为 δ_0，则旋回到位置点 B 航向 CC_i 时的误差为

$$\delta_i = \delta_o + \triangle \delta_i = \delta_o + 360\frac{\triangle t_i}{t_{360}} - (CC_i - CC_o) \quad (29)$$

即在舰船旋回一周的过程中，若能测得每隔 1°航向上的磁罗经航向 CC_i 和所用时间 $\triangle t_i$，以及舰船旋回一周的时间 t_{360} 和起始位置罗经航向上的误差值 δ_0，便可以求得任一航向上的误差值。这种测量只要借助于当代的计算机技术即可很容易地完成。

2.2.2　主航向法误差自动测算

主航向测定法与传统的测定方法一样，不同之处是将现代计算机技术加以应用，在对八个航向的误差测定后，各个航向上的误差均以自动化的手段得到。通过计算机内设定的计算方程式求得各个误差系数 R_i (i = 1, …, 5)，然后便可以求得任意航向上的误差值。但是，这里仍然存在简化模型的模型误差，对于一般精度要求可以满足使用需求。

2.3　磁罗经误差的补偿

由 2.2.1 的分析可以看出，通过初始值 δ_0 和 CC_i 以及所用时间 $\triangle t_i$ 就可以确定任意航向上的误差值。为了使用上的方便，往往将这些数据进行计算机存储并在舰船航行过程中随时进行误差补偿，本文将采用多点采样的神经网络进行误差函数的逼近。图 6～图 8 分别为航向误差补偿前后的误差曲线图。

3　结束语

本文分析了磁通门磁罗经的误差来源及其误差的数学模型，从使用的角度给出了简化的误差数学模型，从而可以借鉴传统自差的测定方法和采用当代计算机技术对误差系数进行自动测算然后进行误差的补偿。本文应用神经网络进行误差函数的逼近得到补偿函数从而可以实现将来的在线补偿。从补偿结果看，补偿后的误差不超过 0.3°，精度有了很大的提高。从实现手段来看，也实现了误差测校的自动化。由于本文作者水平有限，再加上本文所阐述的磁罗经系统研究处于探索阶段，难免有不当之处，敬请批评指正。

参考文献

1　Sheng－Wu Liu, Zhao－nian Zhang, Jamdes C. Hung. A High Accuracy Magnetic Heading System Composed of fluxgate Magnetometers and a Microcomputer [J]. IEEE, 1989.

2　杨晓东、吉春生、史德、姜庆国．磁罗经技术的未来[J]．导航，1994.(4).

3　关政军，陈铎，陈小凤．磁罗经自差的智能测定和校正系统[J]．大连海事大学学报，2002.11. Vol. 28, No. 4.

4 吉春生，史德，杨晓东，赖忠干．霍尔罗经指向原理及其误差校正[R].

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

舷外水密度变化对船舶吃水差影响浅析

香港明华船务有限公司　王锦祥

船舶在一定的装载下，其吃水将随着所经航区舷外水密度的变化而变化；同时大部分船舶的吃水差也可能产生变化。**这是由于船舶在一定装载下，在不同的舷外水密度中所排开水的体积不同，而导致该装载下浮心纵向距船中位置发生了变化，而产生了吃水差的改变。**这对于大型深吃水船、吃水受限制的船，当由海水航区进入淡水航区是值得考虑的。不能简单地将船舶的前后吃水加上吃水变化量。据笔者工作过多艘灵便型的船舶（排水量约 50000t 左右），吃水差均会产生十几厘米的变化。

其变化的情况不难从下面的关系式看出来：

(1) 当船舶装载一定时，不管舷外水密度由 ρ_1 变化到 ρ_2，船舶的排水（重）量△不变；船舶的总重心距船中距离 X_g 也保持不变。

(2)当船舶从舷外水密度 ρ_1 到舷外水密度 ρ_2 时，船舶所排开水体积则由 V_1 变为 V_2。即 $V_1=\triangle/\rho_1$；$V_2=\triangle/\rho_2$。

(3)由于船舶排开水体积由 V_1 变为 V_2，相应的船舶平均吃水便由 d_1 变为 d_2。

因为 $\delta_d=\triangle\times(\rho_s/\rho_2-\rho_s/\rho_1)/(100\times TPC)$(m)

所以 $d_2=d_1+\delta_d$　(m)

式中：ρ_s：标准海水密度，等于 1.025 (g/cm^3)；

ρ_d：舷外水密度变化引起的平均吃水变化量(m)；

TPC：密度变化时的厘米吃水吨数(t/cm)；

(4) 由于船舶的平均吃水由 d_1 变为 d_2，根据 d_1 和 d_2 在船舶静水力参数图（表）查出相应的船舶浮心距船中的距离 X_{b1} 和 X_{b2}。

据公式：$t=\triangle\times(X_g-X_b)/(100\times MTC)$　(m)

式中：t：吃水差　(m)；

X_b：浮心距船中的距离，船中前取正号，船中后取负号　(m)；

X_g：重心距船中的距离，船中前取正号，船中后取负号　(m)；

△：船舶排水量　(t)；

MTC：相应排水量时的厘米纵倾力矩(9.81kN·m/cm)；

当船舶装载一定时，排水量△保持不变，而厘米纵倾力矩 MTC 主要随排水量△而变化。所以船舶在舷外水密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 时，吃水差相应分别为 t_1 和 t_2。即：

$t_1=\triangle\times(X_g-X_{b1})/(100\times MTC)$　(m)

$t_2=\triangle\times(X_g-X_{b2})/(100\times MTC)$　(m)

(5)船舶从舷外水密度 ρ_1 到 ρ_2 时吃水差的变化量 δ_t 为：

$$\delta_t=t_2-t_1=\triangle\times(X_{b1}-X_{b2})/(100\times MTC)=\triangle\times\delta_{Xb}/(100\times MTC)\quad(\mathrm{m})$$

式中：ρ_t：吃水差变化量(m)，正数为浮心向尾移，首倾增大；负数为浮心向首移，尾倾增大；

X_{b1}、X_{b2}：分别为船舶在舷外水密度 ρ_1、ρ_2 时的浮心距船中距离，船中前取正号，船中后取负号(m)，分别据 d_1、d_2 查取。

$\delta_{Xb}=(X_{b1}-X_{b2})$：船舶从舷外水密度 ρ_1 到 ρ_2 时，浮心纵向距船中距离的变化量 (m)，正数为浮心向尾移，负数为浮心向首移。

注意：有的静水力参数资料中，采用船中前取负号，船中后取正号。

从上式中可以看出，船舶在一定的装载下从舷外水密度 ρ_1 到 ρ_2 时吃水差的变化量 δ_t 主要随浮心纵向距船中距离变化量 δ_{Xb} 的变化而变化。不同船型的船舶其浮心距船中的距离随吃水的变化是不一样的，这可以从静水力参数图(表)中看出来。从其变化率的大小也可以看出舷外水密度的变化对吃水差变化量影响的大小。

(6) 船舶从舷外水密度 ρ_1 到舷外水密度 ρ_2 后，考虑到 δ_t 数值一般相对较小，漂心也较接近船中，可简单地将吃水差变化量 δ_t 平均分配于船舶的前后吃水。则船舶新的前后吃水分别为：

$d_{F2}=d_{F1}+\delta_d+\delta_t/2$　(m)

$d_{A2}=d_{A1}+\delta_d-\delta_t/2$　(m)

式中：d_{F1}、d_{F2}：分别为舷外水密度 ρ_1、ρ_2 的首吃水；

d_{A1}、d_{A2}：分别为舷外水密度 ρ_1、ρ_2 的尾吃水。

由于笔者水平所限，分析中不足之处，恳请大家批评指正。

大连海事大学：船舶通信与导航，1995.

5 史德，杨晓东，吉春生．磁罗经自差半自动测校装置[J]．船舶工程，1998(2).

6 G.W.Barber, A.S.Arrott.History and Magnetics of Compass Adusting [J].IEEE Transctions on magnetics, Vol 24.No.6, November 1988.

7 吉春生，杨晓东，姜璐．磁测式船舶姿态自动测量装置研究[J]．上海：船舶工程，1999(5).

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net