

一种新型测向传感器——磁通门罗盘*

胡 平 孟宪萍 江钧仁

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

提要 本文对磁通门罗盘的基本工作原理、实验线路以及主要技术指标和一些测量数据作简要介绍, 最后对仪器的误差进行简单分析并提出一些减小误差的改进措施。

关键词 新型测向传感器 磁通门罗盘

在海洋环境中, 测量运动载体的方位和姿态角时, 如流向、风向、海洋资料浮标方位、海洋机器人水下运动姿态等, 都要用到方位传感器。由于海洋环境条件十分恶劣, 对传感器的要求也极其严格。以往常用的磁罗盘或惯性平台多为有触点部件, 易于磨损, 其工作可靠性较差, 而且结构复杂、功耗大、使用维修都比较困难。磁通门罗盘能从根本上克服以上的缺点, 它无触点部件、无轴承、无永久磁铁, 所以具有功耗小、结构简单、可靠性高、寿命长、使用维修方便等特点。目前国内外已获得广泛应用, 它是当今比较先进、比较理想的测向传感器。

我们于 1985 年底开始这方面的研制工作, 几年的实践, 解决了一些比较关键性的问题, 如磁环加工工艺、温漂、非线性误差等。其性能指标已达到国外 80 年代同类产品的水平。

一、基本工作原理

磁通门罗盘的基本工作原理是依据二次谐波法原理制作而成的^[1]。它是由高导磁软磁磁环, 外绕一层激励线圈和两组互成 90° 的测量线圈构成的感应部件, 通过感应地球磁场水平分量的两个正交分量来确定方向的。图 1 为磁通门探头的基本工作原理。由频率为 f_0 的激励源给激励绕组施加一定幅度的电压, 其激励电流 I_{ex} 的幅度要足以使磁环达到深度饱和状态^[2]。在无外磁场时, 即 $H_0 = 0$ 时, 磁环中的磁通变化量正负半周对称, 在测量绕组中感应的信号仅有 $f_0, 3f_0, 5f_0, \dots$ 奇次谐波成分。当存在外磁场时, 即 $H_0 \neq 0$, 则在某半周内 H_0 与激励磁场叠加, 使磁环提前饱和。在另一半周内, H_0 与激励磁场抵消, 使磁环推迟饱和。于是就造成正负半周间出现磁通变化的速率差。这样, 测量绕组中的感应信号波形就不对称, 从而产生偶次谐波, 其中二次谐波成分最强, 它的幅度与

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1842 号。承蒙史贻成同志指导, 深志谢忱。
接受日期: 1990 年 7 月 20 日。

外磁场 H_0 在一定范围内成正比关系, 相对于激励信号的相位与外磁场相对应。经过信号处理, 就可以通过测量二次谐波的大小来测量外磁场, 其大小与相位即代表了外磁场的大小和磁探头与地磁场的夹角或磁方位角。

其电压灵敏度关系式为:

$$K = 32\pi\mu_r AWf_0 \times 10^{-11} V/A/m^{(1)} \quad (1.1)$$

式中, μ_r 为磁环有效导磁率; W 为测量绕组匝数; A 为磁芯横截面积 (cm^2); f_0 为激励频率 (Hz)。

测量绕组是一对在空间相互垂直的线圈, 图 2 所示。

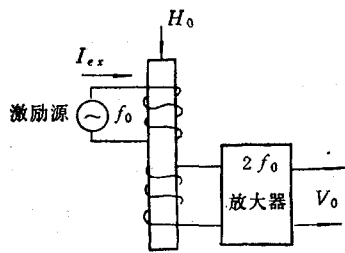


图 1 磁通门探头基本工作原理

Fig. 1 Basic operation principle of the fluxgate magnetic compass sensor

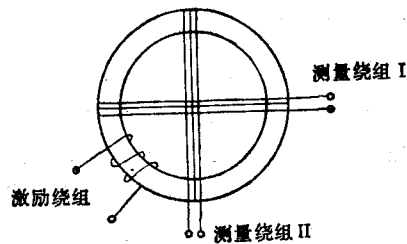


图 2 磁环绕制图

Fig. 2 Chart for winding the magnetic ring

若激励信号频率为 f_0 , 外磁场在测量绕组 I 的法向分量的投影为 H_1 , 据二次谐波法原理, 在测量绕组 I 中的二次谐波电压的幅值与 H_1 成正比。即:

$$V_{21} = KH_1 \sin 2\omega_0 t (V) \quad (1.2)$$

式中, ω_0 为激励信号的角频率 (rad/s); V_{21} 为测量绕组 I 产生的二次谐波分量; K 为测量绕组电压灵敏度。

同理: 测量绕组 II 产生的二次谐波电压分量为:

$$V_{22} = KH_2 \sin 2\omega_0 t (V) \quad (1.3)$$

假定两测量绕组的电压灵敏度一样, 且磁环为水平放置, 则测量绕组 I, II 所接收的是地球磁场水平分量的两个正交分量 (图 3)。

所以有:

$$H_1 = H \cos \theta \quad (1.4)$$

$$H_2 = H \sin \theta \quad (1.5)$$

式中, H 为地磁场水平分量; θ 为地磁场北极方向, 与测量绕组 I 的法向方向的夹角, 可视为被测方位角。

故(1.2),(1.3)两式可写成:

$$V_{21} = KH_1 \sin 2\omega_0 t = KH \cos \theta \sin 2\omega_0 t \quad (1.6)$$

$$V_{22} = KH_2 \sin 2\omega_0 t = KH \sin \theta \sin 2\omega_0 t \quad (1.7)$$

将 V_{22} 移相 90° 得:

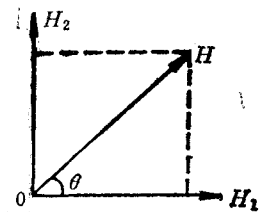


图 3 地磁场沿线圈 I, II 法线方向的水平投影

Fig. 3 Level projection of the terrestrial magnetic field along the normal of coils I, II

$$V'_{22} = KH \sin \theta \sin (2\omega_0 t - 90^\circ) = KH \sin \theta \cos 2\omega_0 t \quad (1.8)$$

将(1.6)(1.8)两式相加得合成信号为:

$$V = V_{21} + V'_{22} = KH \cos \theta \sin 2\omega_0 t + KH \sin \theta \cos 2\omega_0 t = KH \sin (2\omega_0 t + \theta) \quad (1.9)$$

(1.9)式为磁通门罗盘的基本方程式。可以看出,在测量线圈中感应的二次谐波电压将其中一个移相 90° 相加后,所得合成矢量 V 的初始相位 θ 与被测方位角相关^[4]。测头旋转一周,二次谐波电压的相位与测量绕组在地球磁场中的方位角有一一对应的关系。

二、磁通门罗盘方框图及简述

图 4 为磁通门罗盘方框图,其激励信号由高稳定性的晶体振荡器提供。晶振频率取 $5.4 \times 10^3 \text{kHz}$, 通过 720 分频,产生 7.5kHz 的激励方波。磁环次级的两个测量绕组产生的二次电压分量,一路经移相器移相 90° 与另一路信号合成,通过放大、滤波、整形,输出 15kHz 方波,再与 7.5kHz 的基准信号进行相位比较。此时,鉴相器输出脉冲宽度随磁环相对于地球磁场的位置不同而产生相应的变化。利用这一变化的信号去控制与门的输入,再向与门另一输入端填充 $5.4 \times 10^3 \text{kHz}$ 的高频脉冲,罗盘相对于地磁场变化几度,填充的脉冲数就变化了几个。通过对填充脉冲计数得出方位值。因为 15kHz 方波的周期为 $5.4 \times 10^3 \text{kHz}$ 的 360 倍,所以 15kHz 变化一个周期将有 360 个高频填充脉冲进入与门,计数输出即为 360° 。电路如图 5 所示。

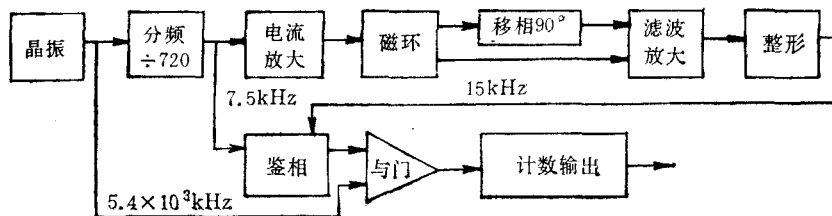


图 4 磁通门罗盘方框图

Fig.4 Block diagram of the fluxgate magnetic compass

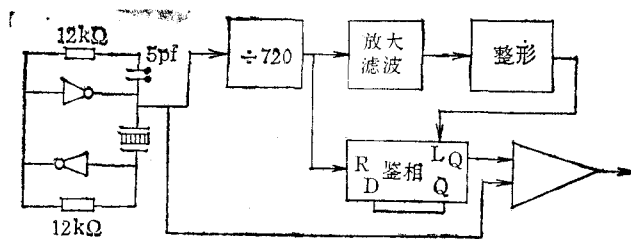


图 5 分频与鉴相

Fig. 5 Frequency demultiplier and phase detector

由于测量绕组感应的谐波信号比较微弱,故首先应进行放大,再行滤波,检出二次谐波信号。滤波器的作用主要是检出合成信号中的二次谐波电压,对其他谐波成分具有较

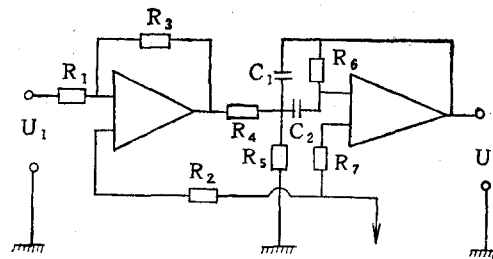


图 6 放大、滤波电路

Fig. 6 Amplifier and filter circuits

强的抑制能力,滤波器必须稳定可靠。由于电感带有磁性,它能干扰磁环的空间磁场,影响测量精度和整机性能,所以磁通门罗盘不宜使用 LC 无源滤波电路。我们采用具有多重负反馈的有源带通滤波电路。该电路具有结构简单、易于调整、输出阻抗低、稳定性好并有一定的电压增益等特点。电路如图 6 所示。

三、主要技术指标及同类产品的性能比较

1. 主要技术指标

测量范围: 0—360°; 准确度: $\pm 3^\circ$;

工作温度: -10°C — $+45^\circ\text{C}$; 分辨率: 0.5° ;

允许倾角: $\pm 30^\circ$; 工作电压: $+12\text{V}(\text{DC})$;

耗电: $< 30\text{mA}$;

输出形式: 脉冲计数和 BCD 码串行输出。

表 1 实验室测试数据 [单位: $^\circ$]Tab. 1 Data obtained in laboratory (unit: $^\circ$)

标称角度	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
实测角度(正转)	0	31	61	91	121	151	181	210	239	269	299	329	359
误差	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	-1	-1	-1	-1	-1
实测角度(反转)	0	31	61	91	121	150	180	210	239	269	299	329	359
误差	0	+1	+1	+1	+1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1

2. 性能比较

表 2 所标的准确度系指测量的最大偏差,而非均方差,1989 年 5 月在国家海洋局计量站青岛分站作了环境实验,其均方差均在 2° 以下。可以看出,在测量准确度方面可以和国外产品相比。实验证明,如果线路部分置于 -10°C 以上环境中,测头部分可在 -30°C 情况下正常工作不超差。

表 2 几种同类产品的性能比较

Tab. 2 Comparison of characteristics for similar products

生产单位	测量范围	准确度	分辨率	允许倾角	温度范围(°C)	备 注
[美] EG&G Sealink Systems	0—360°	<5°	1.4°	—	0—30	用于 630 型矢量海流计
[美] EG&G Environmental Equipment Division	0—360°	±5°	2.8°	—	0—30	用于 CT/3 型电测海流计
Interocean Systems, Inc.	0—360°	±2°	1.4°	±25°	0—30	用于 S ₄ 型海流计
Interocean Systems, Inc.	0—360°	+4°	1.4°	±30°	0—30	用于 135 型海流计
中国科学院海洋研究所	0—360°	±3°	0.5°	±25°	-4—+45	用于 SLC ₁₆ -1 型海流计
中国科学院海洋研究所	0—360°	±3°	0.5°	±40°	-10—+45	用于海洋资料浮标

四、误差的简要分析及减小误差的一些措施

引起磁通门罗盘误差的因素较多,比较明显的有以下几点。

1. 仪器本身的固有零误差

这种误差的来源主要是铁芯材料的磁滞和由某种原因造成的特性曲线的不对称性而导致的误差^[2]。这种误差,可以通过选用矫顽力较小的高导磁软磁材料作铁芯,铁芯形状采用无定向的镯环结构。在保证具有足够激励灵敏度的情况下,镯环的内外径之差应尽量地小,亦即磁芯叠厚应尽量薄,这样,可确保在一定的激励幅度下,全部铁芯材料均能充分饱和且铁芯内的磁场均匀分布,有效地抑制和减小仪器的噪声和固有零误差。

2. 仪器外部的零误差

通常引起外部零误差的原因有二^[2],一是激励电压或电流的不对称分量的影响,即其偶次谐波成分的影响。二是外部杂散磁场的影响。

激励电压的偶次谐波主要来源于振荡器。采用高稳定度晶体振荡器,且在主振与输出级间用单稳分频电路并使供电电源充分去耦,便能显著提高激励方波对称度。为防止杂散磁场的附加影响,磁环可采用无定向结构和适当的屏蔽措施。在实际工作中,测头远离外磁场和铁磁物质 2m 以上,也可有效地防止外磁场的附加影响。

3. 移相电路、放大滤波电路不稳定引起的误差

移相电路必须稳定可靠,而且应准确地移相 90°,因为它的任何变化都将引起输出的合成信号产生不应有的附加相移。

放大滤波电路亦必须稳定可靠,它是整机性能的关键,尤其对相邻两奇次谐波的抑制能力应大于 40db,本底噪声应限制在微伏量级,元器件的温度漂移应尽量地小。为此,移相电路和放大滤波电路都应选用高稳定、高可靠性、温度系数小、噪声低的元器件。在线路中还应采取适当的温补措施。

4. 磁环加工工艺引起的误差

当磁环的材料和尺寸确定之后,绕制工艺亦是相当重要的。激励绕组分绕在四个象限中,可使激励磁场均匀分布。两测量绕组应尽量对称。保持正交成 90° ,这样,可有效地抑制奇次谐波的干扰,特别是抑制基波的调制干扰。在仔细注意上述各种因素的影响并采用相应的措施之后,仪器的整个系统误差可减小到令人满意的程度,磁通门罗盘可以在环境温度变化的情况下长时间稳定可靠的工作。

五、讨 论

1. 磁通门罗盘的磁环由较薄的带状软磁材料绕制而成,实验证明,在材料的理想工作频段内,适当提高激励频率有利于灵敏度的提高。

2. 在激励方式上,采用方波激励。因为方波激励其灵敏度与激励信号的幅度变化无关,可获得较高的稳定性。

3. 在保证具有足够选择性的情况下,应尽量增大滤波器的带宽,这样,可获得较高的相位稳定。

4. 放大器、滤波器必须稳定可靠,特别是热稳定性。除选用高精度、热稳性好的元器件外,尚需进行电路补偿,方能保证在 -10°C — 45°C 温度范围内正常工作。

5. 实验证明,引起相位漂移的主要原因是振荡电路、移相电路、放大滤波电路以及电源电路的稳定性。磁环材料随温度的变化对整机精度的影响相对而言比以上要小得多。前者可以通过电路的合理设计和采取相应的补偿措施予以解决。后者的发现使得磁通门罗盘更具多功能性。它不仅适于测量水文要素,而且适于测量温差变化较大的气象要素。海洋资料浮标方位的测量,就是将整个线路部分置于温变不大的壳体中,测头置于壳体外的空气中获得了长期稳定可靠的工作。

参 考 文 献

- [1] 郭来祥, 1978, 磁调制器的理论与计算(一), 电测与仪表, 6: 13—20 页。
- [2] 郭来祥, 1978, 磁调制器的理论与计算(三), 电测与仪表, 8: 5—6 页。
- [3] 黄源高, 1985, 数字补偿磁通门磁力仪分析与设计, 电测与仪表, 5: 6—7 页。
- [4] 陆怡良, 1984, 磁通门磁测仪的线路分析与设计, 电测与仪表, 7: 12—15
- [5] Primdal, 1979, The Fluxgate magnetometer, *Sci. Instrum*, 12: 241—253。

FLUXGATE MAGNETIC COMPASS —A NEW TYPE OF DIRECTION SENSOR*

Hu Ping, Men Xianping and Jiang Junren

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071*)

ABSTRACT

Fluxgate Magnetic Compass is a new type of direction sensor. It has no contact point parts, bearings and natural magnets. Therefore the compass is noted for small volume, light, high reliability, long life-span, low power loss and easy maintenance. The fluxgate magnetic compass has a wide application in the measurement of current direction, wind direction, oceanographic data buoy bearing and direction of underwater robots. It is an advanced and ideal direction measurement instrument widely applied at home and abroad.

This paper deals with the basic operation principles, experiment circuits, main technical characteristics, the measurement data of the fluxgate magnetic compass, and the data errors of the instrument. Finally we put forwards some improvements about it.

Key words New type of direction sensor, Fluxgate magnetic compass.

* Contribution No. 1842 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.