

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03172>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 郭成豹, 王文井, 台秭艳. 水下磁传感器定位定姿数值验证实验研究[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 238-246.
GUO C B, WANG W J, TAI Z Y. Numerical verification test of positioning and attitude determination of underwater magnetic sensor[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 238-246.

水下磁传感器定位定姿数值 验证实验研究



扫码阅读全文

郭成豹*, 王文井, 台秭艳

海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要: [目的] 旨在构建一种水下磁传感器校准装置设计方案。该装置由电磁线圈和组合导航设备构成, 能够搭载水上机动平台在水面航行, 实现水下磁传感器位置和姿态的高精度校准。[方法] 根据电磁线圈的姿态方位信息及其在水下磁传感器处产生磁场的测量值, 采用非线性最优化算法计算水下磁传感器的位置和姿态, 并建立全系统的数学模型进行数值验证实验, 将电磁线圈的方位和姿态测量精度、磁传感器的噪声和测量误差以及地磁场干扰的影响纳入考虑。[结果] 实验结果表明, 磁传感器在水下 30 m 深度时, 装置的定位误差均值不大于 0.06 m, 姿态误差均值不大于 0.20°。磁传感器自身精度是影响校准精度的主要因素。[结论] 校准装置能够同时实现水下磁传感器位置和姿态的高精度校准, 具有较高应用价值, 可广泛用于水下磁性目标探测、资源勘探、医学等领域, 尤其适用于姿态发生偏移的水下磁传感器校准。

关键词: 静磁场; 水下磁传感器; 电磁线圈; 校准; 定位

中图分类号: U665.18

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03172

Numerical verification test of positioning and attitude determination of underwater magnetic sensor

GUO Chengbao*, WANG Wenjing, TAI Ziyang

School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: [Objective] This study proposes a design scheme for an underwater magnetic sensor calibration device. The device is composed of an electromagnetic coil and integrated navigation equipment which can be carried on a mobile platform to sail on the water surface, and realize the high-precision calibration of the position and attitude of the underwater magnetic sensor. [Methods] According to information on the coil's attitude, orientation and trajectory, and the measured values of the magnetic field generated by the coil at the magnetic sensor, the position and attitude of the underwater magnetic sensor can be calculated using a nonlinear optimization algorithm. The mathematical model of the whole system is established and numerical verification tests are carried out, considering the effects of the measuring accuracy of the coil's position and attitude, the magnetic sensor's noise and measuring error, and geomagnetic interference. [Results] When the device is used and the magnetic sensor is at a depth of 30 m underwater, the mean value of position error is not more than 0.06 m, and the mean value of attitude error is not more than 0.20°; the accuracy of the magnetic sensor itself is the main factor affecting the calibration accuracy. [Conclusions] The proposed calibration device can achieve the high-precision calibration of the position and attitude of an underwater magnetic sensor at the same time, giving it great application value. It can be widely used in underwater magnetic target detection, resource exploration, medicine and other fields, especially scenarios involving the attitude deviation of underwater magnetic sensors.

Key words: static magnetic field; underwater magnetic sensor; electromagnetic coil; calibration; localization

收稿日期: 2022-11-10 修回日期: 2023-01-15 网络首发时间: 2023-03-12 17:07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277176)

作者简介: 郭成豹, 男, 1975年生, 博士, 副教授。研究方向: 电气工程, 舰船消磁。E-mail: 1284540960@qq.com

王文井, 女, 1998年生, 硕士生。研究方向: 电气工程, 磁场测量。E-mail: 1390537663@qq.com

*通信作者: 郭成豹

0 引言

地磁导航、水下磁性目标探测、海洋磁场测量、资源勘探、舰船磁场隐身防护等领域的研究^[1-7]均依赖于水下磁传感器的位置姿态数据,而且求解大多数对磁传感器的位置姿态误差十分敏感。因此,对水下磁传感器位置姿态的测量和校准提出了很高的要求^[8]。对于临时布设的水下磁传感器,难以精确确定其位置,更难以精确调整其姿态。对于固定安装的水下磁传感器阵列,即使安装初期其位置和姿态是精准的,后期受到海流冲击、地质沉降等因素影响,位置和姿态也都会产生偏移,从而使得偏差越来越大。因此,水下磁传感器不但在安装初期需要进行位置和姿态的校准,在后期使用过程中也需进行定期校准。声学定位等手段常被用于对水下磁传感器的定位,但存在设备复杂、可靠性不高,尤其是定位精度差的缺点^[9-11]。特别是水声定位易受海底、海面的反射吸收以及水文因素的影响^[12],导致定位精度下降。因此,如何快速有效地在海上对水下磁传感器进行精准定位与定姿成为了一大难题。

磁源定位法是一种可靠的水下传感器定位校准手段。例如,郭成豹等^[13]提出了一种水下磁传感器定位方法,采用电磁线圈与组合导航设备组合的装置,使装置通过磁传感器上方附近,根据电磁线圈的磁矩、姿态和位置信息,以及磁传感器的磁场测量信息,采用优化算法解算得到水下磁传感器的位置。电磁线圈产生的是静态和低频的磁场信号,信号传播不受空气、海水和海底地形的影响;组合导航设备实时测量电磁线圈的位置和姿态,受海上风浪影响较小,因此具有较强的抗干扰能力。但是,该方法仅考虑了水下磁传感器的定位问题,没有考虑定姿问题和海上地磁场干扰问题,也未对组合导航设备和磁传感器的测量误差进行分析。

为解决文献[13]的不足,本文将开展水下磁传感器校准装置方案设计,对海底30 m处的水下磁传感器同时进行位置和姿态校准的数值验证实验。装置以电磁线圈作为磁源,配备组合导航设备,搭载机动平台通过海底磁传感器上方水面。将磁传感器的位置和姿态值作为未知量,通过水下磁传感器与电磁线圈之间的坐标和磁场转换,采用最优化算法,同时实现水下磁传感器的位置和姿态的求解。为解决地磁波动干扰问题,将地磁监测传感器测量的地磁环境干扰转换到水下磁传感器坐标系下,通过迭代优化计算,达到最终

消除水下磁传感器所测量的地磁波动干扰磁场的目的。为装置中的组合导航设备和水下磁传感器分别配置高精度和低精度两组参数,充分考虑海上风浪的影响以及地磁波动干扰等各种干扰因素,建立全系统的数学模型,并进行水下磁传感器定位和定姿数值验证试验。深入研究电磁线圈位置和姿态测量精度、磁传感器的噪声和测量误差等因素对水下磁传感器定位和定姿精度的影响,并给出定量分析结果。

1 水下磁传感器校准装置设计

水下磁传感器校准装置由电磁线圈,组合导航设备、供电设备、通信设备和数据采集分析等设备组成,可搭载橡皮艇等无磁载具,从水下磁传感器上方航行通过,实现对水下磁传感器位置姿态的检测和校准,如图1和图2所示。其中,电磁线圈为正方形,边长 $a=b=1.8\text{ m}$,安匝量为 $25\text{ A}\times 200\text{ 匝}=5\text{ 000 AT}$,磁矩 16 200 Am^2 ,使用恒流源提供直流电流,电流精度 $\leq 1\%$,可在水下30 m处的磁传感器上产生幅值超过100 nT的磁场。电源电流噪声为 $\pm 5\text{ mA}$,在水下30 m处的磁传感器上产生的磁场噪声值小于0.1 nT,影响可忽略不计。组合导航设备采用实时动态(realtime kinematic, RTK)差分定位实现厘米级定位精度;通信设备采用数传电台;数据采集分析设备记录组合导航设备的实时测量数据(电磁线圈的方位、姿态等)。校准装置中所使用的材料均采用无磁或者低磁材料,电源和RTK设备也尽量采用低磁壳体,以减少磁场干扰。评估发现,结构材料和设备在30 m之外产生的磁场小于0.1 nT,对校准的影响可忽略不计。

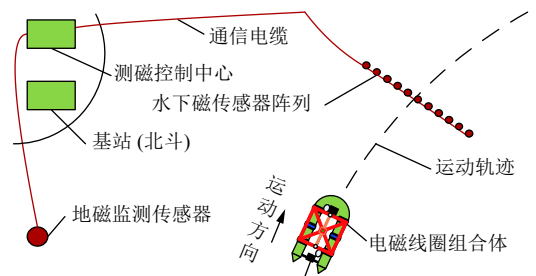


图1 水中磁传感器校准示意图

Fig. 1 Underwater magnetic sensor calibration

地磁监测传感器通常是经过校准的,其坐标轴与地理坐标系重合。电磁线圈产生的磁场影响范围达到300 m,当地磁监测传感器与水下磁传感器和电磁线圈轨迹的直线距离超过300 m时,电磁线圈在地磁监测传感器处产生的磁场小于0.1 nT。为避免线圈磁场对地磁监测传感器产生

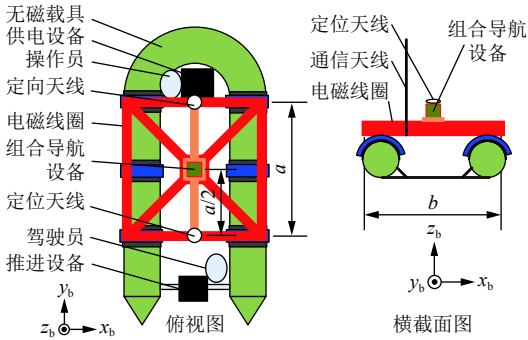


图2 校准装置的构成

Fig. 2 The structure of calibration device

影响,在距离水下磁传感器和电磁线圈轨迹 300 m 之外的合适位置布置地磁监测传感器,避免地磁监测传感器受到线圈磁场影响,且能够较好地反映水下磁传感器附近的环境磁场。可以认为,地磁监测传感器测量的磁场只包含地磁背景磁场(处于地理坐标系),不包含线圈磁场。

2 水下磁传感器校准原理

2.1 坐标系定义及其转换关系

如图3所示,定义线圈坐标系 $ox_b y_b z_b$, 原点 o 为线圈中心。 x_b 轴沿线圈横轴指右; y_b 轴沿线

$$C_g^b = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\theta\sin\psi & -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\sin\theta\cos\psi & -\sin\varphi\cos\theta \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi & \sin\theta \\ \sin\varphi\cos\psi - \cos\varphi\sin\theta\sin\psi & -\sin\varphi\sin\psi - \cos\varphi\sin\theta\cos\psi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

空间矢量 r 在线圈坐标系 $ox_b y_b z_b$ 和地理坐标系 $ox_g y_g z_g$ 坐标轴上的分量分别为 $r_{x_b}, r_{y_b}, r_{z_b}, r_{x_g}, r_{y_g}, r_{z_g}$, 则矢量 r 在两坐标系坐标轴的分量可用坐标变换矩阵 C_g^b 描述:

$$\begin{bmatrix} r_{x_b} \\ r_{y_b} \\ r_{z_b} \end{bmatrix} = C_g^b \begin{bmatrix} r_{x_g} \\ r_{y_g} \\ r_{z_g} \end{bmatrix} \quad (2)$$

相应地,从线圈坐标系到地理坐标系的坐标转换矩阵为: $C_b^g = (C_g^b)^T$ 。

类似地,可定义磁传感器坐标系 $ox_s y_s z_s$, 磁传感器姿态角 $(\psi_s, \theta_s, \varphi_s)$, 得到从磁传感器坐标系到地理坐标系的坐标转换矩阵 C_s^g , 从地理坐标系到磁传感器坐标系的坐标转换矩阵 C_g^s 。

2.2 定位定姿原理

对水下磁传感器进行校准时,电磁线圈和组合导航设备组合而成的校准装置搭载着无磁载具,在水面上航行通过水下磁传感器上方时,同步采集电磁线圈的姿态方位信息,水下磁传感器以及地磁监测传感器的磁场测量数据,如图4

圈纵轴指前; z_b 轴沿线圈竖轴指上并与 x_b, y_b 轴构成右手直角坐标系。定义地理坐标系 $ox_g y_g z_g$, 其中, x_g 轴沿当地纬线指东, y_g 轴沿当地子午线指北, z_g 轴沿当地地理垂线指上并与 x_g 和 y_g 轴构成右手直角坐标系。

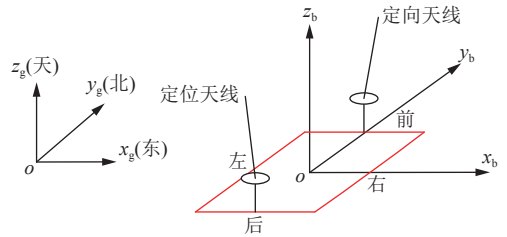


图3 地理坐标系和线圈坐标系

Fig. 3 Geographic coordinate system and coil coordinate system

线圈姿态角 (ψ, θ, φ) 是由线圈坐标系 $ox_b y_b z_b$ 与地理坐标系 $ox_g y_g z_g$ 之间的关系确定的,由航向角 ψ 、纵摇角 θ 和横摇角 φ 这3个欧拉角组成。航向角 ψ 为线圈 y_b 轴在地面上的投影与 y_g 轴间的夹角,以线圈前部右偏航为正;纵摇角 θ 为线圈 y_b 轴与地平面(平面 $ox_g oy_g$)间的夹角,以线圈前部抬头为正;横摇角 φ 为线圈 z_b 轴与包含线圈 y_b 轴的铅垂面间的夹角,以线圈向右倾斜为正。根据线圈的姿态角得到由地理坐标系到线圈坐标系的坐标转换矩阵 C_g^b ^[14-15]。

所示。

根据线圈磁矩、位置和姿态,采用 Biot-Savart 定律计算线圈磁场,并通过坐标转换矩阵 C_b^g 转换到地理坐标系下,再通过坐标转换矩阵 C_s^g 将其转换到磁传感器坐标系下,即可得到磁传感器处的线圈磁场计算值。

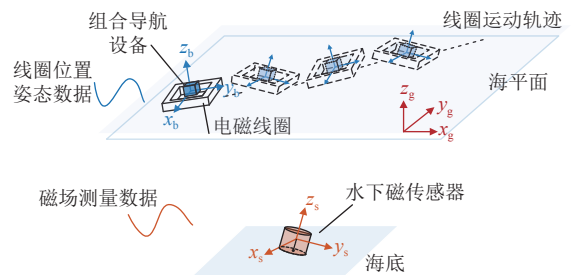


图4 水下磁传感器校准原理

Fig. 4 The principle of underwater magnetic sensor calibration

水下磁传感器测得的磁场包含线圈磁场和地磁背景磁场(处于磁传感器坐标系)。地磁背景磁场包含稳定地磁场和地磁环境波动磁场。稳定地磁场在短时间内可认为是不变的,可从水下磁传感器和地磁监测传感器测量值中直接减去,分

别得到水下磁传感器测量的线圈磁场(磁传感器坐标系)和地磁环境波动磁场(磁传感器坐标系)之和,以及地磁监测传感器测量的地磁环境波动磁场(地理坐标系)。水下磁传感器和地磁监测传感器处于同一个地磁环境磁场之中,二者测量得到的地磁环境波动磁场是相同的,只是所处的坐标系不同。将地磁监测传感器测得的地磁环境波动磁场(地理坐标系)转换到磁传感器坐标系下,并将其从水下磁传感器测量值中减去,可以得到水下磁传感器测量的线圈磁场测量值(磁传感器坐标系)。

由于水下磁传感器位置和姿态为待求量,因此将水下磁传感器测量的线圈磁场测量值(磁传感器坐标系)和线圈磁场计算值之差的平方和作为目标函数,通过最优化算法的迭代消去地磁环境波动磁场,并最终求得水下磁传感器的位置和姿态值。对单个磁传感器进行定位定姿的具体流程如图 5 所示。

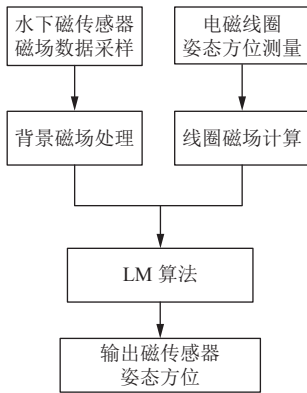


图 5 水下磁传感器校准流程图

Fig. 5 The flowchart of underwater magnetic sensor calibration

对于水下有多个磁传感器且位置不确定的情况,校准装置可以从水下磁传感器所在区域的水面航行通过,利用测得的初始航行轨迹和磁场数据对多个磁传感器进行初始定位和定姿。此时,部分水下磁传感器测得的磁场幅值较小,表明初始航行轨迹与部分水下磁传感器位置距离较远,初始定位定姿结果可能不太理想。解决方法是,根据初始定位的结果,校准装置再次分别从水下磁传感器上方航行通过,尽量使航行轨迹与水下磁传感器距离较近,能够测得较大幅值的磁场数据,从而实现各个水下磁传感器的高精度定位和定姿。

3 数值验证实验

建立所设计的水下磁传感器校准装置的全系统数学模型,并进行数值实验验证。设被定位的

水下磁传感器和地磁监测传感器均为典型的三分量磁通门传感器。磁传感器的采样率为 5 Hz 或者 100 Hz,与组合导航设备一致。水下磁传感器通常在对磁场数据进行平滑滤波处理后,再按照采样率输出最终的磁场测量数据。例如,当采样间隔为 0.2 s 时,磁传感器实际输出的磁场数据为 0.2 s 内采集的所有磁场数据的平均值,相对 RTK 设备输出的线圈位置姿态数据,磁场数据对应的时间将会滞后 0.1 s。为使线圈磁场数据与位置姿态数据实现时间对齐,需要将磁场数据对应的时间调前 0.1 s。

设被定位的水下磁传感器在地理坐标系下的坐标真实值为 $(x_s = -5 \text{ m}, y_s = -5 \text{ m}, z_s = -30 \text{ m})$,姿态角真实值为 $(\psi_s = 60^\circ, \theta_s = 10^\circ, \varphi_s = 10^\circ)$ 。

3.1 设备配置组合

按照一般可获得的测量设备精度水平,将水下磁传感器及其校准装置的配置分为高精度(H)和低精度(L)两组,如表 1 和表 2 所示。

表 1 组合导航设备参数配置

Table 1 Parameters of integrated navigation equipment

参数	高精度	低精度
数据更新率/Hz	100, 5	5
位置噪声/m	0.05	0.05
航向偏差/ $^\circ$	0.1	0.5
姿态偏差/ $^\circ$	0.02	0.1
航向、姿态噪声/ $^\circ$	0.1	0.5

表 2 水下磁传感器参数配置

Table 2 Parameters of underwater magnetic sensor

参数	高精度	低精度
噪声/nT	0.1	0.5
正交误差/ $^\circ$	0.1	0.5
线性误差/%	0.01	0.05
比例误差(F.S)/%	± 0.1	± 0.5

表 3 给出了 6 种不同精度的设备配置组合。当数据更新率为 5 Hz 时,有 L-L(5 Hz), L-H(5 Hz), H-L(5 Hz), H-H(5 Hz) 这 4 种组合模式。当数据更新率为 100 Hz 时,有 H-H(100 Hz) 和 H-L(100 Hz) 两种组合模式。其中, H-H 代表高精度的组合导航设备与高精度磁传感器组合, H-L 代表高精度的组合导航设备与低精度磁传感器组合, L-H 代表低精度的组合导航设备与高精度磁传感器组合, L-L 代表低精度的组合导航设备与低精度磁传感器组合。

表3 不同精度的设备配置组合

Table 3 Different precision configuration combination

设备配置	数据更新率 /Hz	磁传感器/Hz		
		低精度	高精度	
组合导航设备	低精度	5	L-L(5)	L-H(5)
	高精度	5	H-L(5)	H-H(5)
		100	H-L(100)	H-H(100)

由于传感器存在系统内部噪声,设地磁监测传感器的系统噪声是幅值为0.1 nT的随机噪声^[16]。

3.2 地磁背景磁场的设定

在地理坐标系下,设地磁背景磁场中的稳定地磁场为北向33 800 nT、东向-3 000 nT、垂向36 800 nT。添加 ± 5 nT之间的随机噪声和幅值为20 nT以内的渐变噪声作为地磁背景磁场中的地磁波动值^[17],如图6所示。

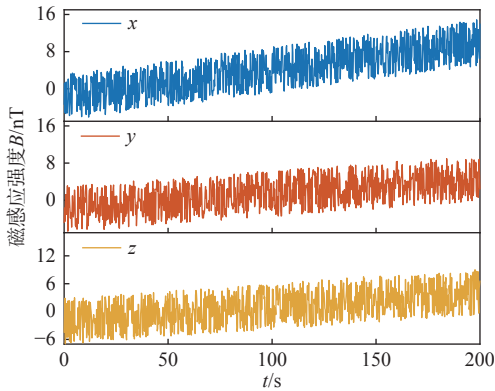


图6 地磁背景磁场中的地磁波动

Fig. 6 Geomagnetic fluctuation in background magnetic field

其中,渐变噪声的起点在 $-10 \sim 0$ nT之间随机选取,终点在 $0 \sim 10$ nT之间随机选取。

3.3 电磁线圈运动轨迹

设校准装置的电磁线圈轨迹为十字型轨迹,含轨迹1和轨迹2,线圈运动速度为2 m/s。为模拟风、浪、流对线圈运动造成的影响,在线圈的运动轨迹中加入了随机变化。对于线圈运动产生的位置数据,在线圈的运动速度2 m/s上添加 ± 0.1 m/s的随机偏差;在 y_s 轴方向添加按照幅值5 m、周期72 s的正弦偏移;在 z_s 轴方向添加幅值0.3 m、周期6 s的正弦偏移。

如图7所示,在时间段0~50 s线圈断电进行地磁背景磁场采集;在50~100 s时线圈通电,轨迹1运动起始点坐标为 $(-49.6 \text{ m}, -49.6 \text{ m}, 0 \text{ m})$,结束点坐标为 $(50.4 \text{ m}, 45.6 \text{ m}, 0.25 \text{ m})$,数据采样间隔为0.2 s,对应于 $n_1=251$ 个轨迹点,轨迹点坐标数据为 (x_1, y_1, z_1) 。类似地,在100~150 s时线

圈断电,进行地磁背景磁场采集;在150~200 s时线圈通电,轨迹2运动起始点坐标为 $(-49.6 \text{ m}, 49.6 \text{ m}, 0 \text{ m})$,结束点坐标为 $(50.4 \text{ m}, -55.1 \text{ m}, 0.25 \text{ m})$,数据采样间隔为0.2 s,对应于 $n_2=251$ 个轨迹点,轨迹点坐标数据为 (x_2, y_2, z_2) 。整个轨迹的坐标数据为 $(x_{\text{real}}(i)=x_1+x_2, y_{\text{real}}(i)=y_1+y_2, z_{\text{real}}(i)=z_1+z_2)$,对应 $n=n_1+n_2$ 个轨迹点, $i=1, 2, \dots, n$ 。

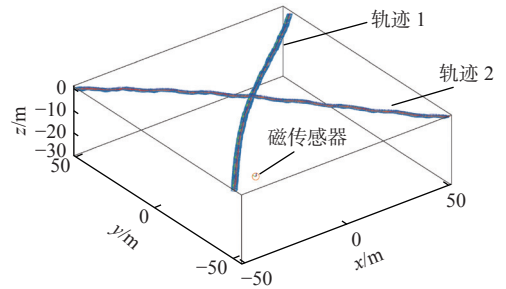


图7 校准装置的运动轨迹

Fig. 7 Trajectory of calibration device

同样地,在线圈的姿态角上分别加入随机变化,轨迹1的航向角平均值为 55° ,轨迹2的航向角平均值为 135° ;航向角加上幅值 5° 、周期18 s和幅值 1° 、周期1.8 s的正弦变化;纵摇角加上幅值 5° 、周期18 s和幅值 5° 和周期4.5 s的正弦变化;横摇角加上幅值 9° 、周期18 s和幅值 9° 、周期9 s的正弦变化。整个轨迹上产生的姿态数据为 $(\psi_{\text{real}}(i), \theta_{\text{real}}(i), \varphi_{\text{real}}(i))$, $i=1, 2, \dots, n$ 。轨迹1和轨迹2上产生的电磁线圈姿态角如图8和图9所示。

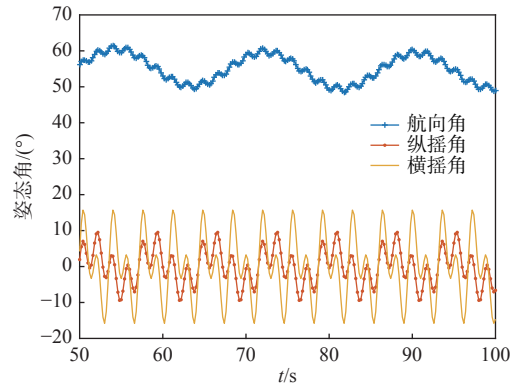


图8 轨迹1上的线圈姿态角

Fig. 8 Attitude angles of coil in Trajectory 1

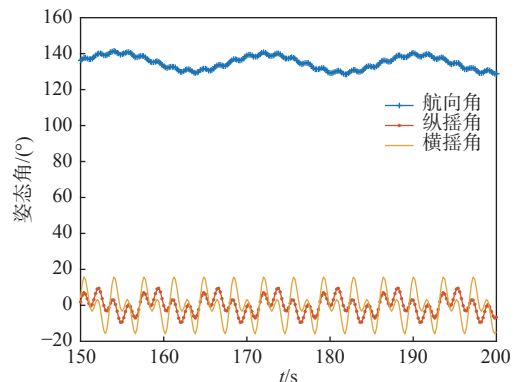


图9 轨迹2上的线圈姿态角

Fig. 9 Attitude angles of coil in Trajectory 2

按照不同精度配置将组合导航设备的误差加入位置姿态数据 $(x_{\text{real}}(i), y_{\text{real}}(i), z_{\text{real}}(i), \psi_{\text{real}}(i), \theta_{\text{real}}(i), \varphi_{\text{real}}(i))$, 得到线圈的位置姿态测量数据 $(x(i), y(i), z(i), \psi(i), \theta(i), \varphi(i))$ 。

3.4 测量磁场的产生

如图 10 所示, 根据第 1 节所述的线圈参数, 线圈通电电流为 I 时, 在空间点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 所产生的磁感应强度由式 (3)~式 (5) 给出。

$$B_x = \mu_0 I \frac{z_0}{4\pi} \left[\frac{1}{v_1} \left(\frac{y_1}{u_1} - \frac{y_2}{u_2} \right) + \frac{1}{v_2} \left(\frac{y_2}{u_4} - \frac{y_1}{u_3} \right) \right] \quad (3)$$

$$B_y = \mu_0 I \frac{z_0}{4\pi} \left[\frac{1}{v_3} \left(\frac{x_1}{u_1} - \frac{x_2}{u_3} \right) + \frac{1}{v_4} \left(\frac{x_2}{u_4} - \frac{x_1}{u_2} \right) \right] \quad (4)$$

$$B_z = \mu_0 I \frac{1}{4\pi} \left[\frac{x_1 y_2}{u_2} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_4} \right) + \frac{x_2 y_1}{u_3} \left(\frac{1}{v_2} + \frac{1}{v_3} \right) - \frac{x_1 y_1}{u_1} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_3} \right) - \frac{x_2 y_2}{u_4} \left(\frac{1}{v_2} + \frac{1}{v_4} \right) \right] \quad (5)$$

其中,

$$x_1 = x_0 - a/2, \quad x_2 = x_0 + a/2, \quad y_1 = y_0 - b/2, \quad y_2 = y_0 + b/2$$

$$v_1 = z_0^2 + x_1^2, \quad v_2 = z_0^2 + x_2^2, \quad v_3 = z_0^2 + y_1^2, \quad v_4 = z_0^2 + y_2^2$$

$$u_1 = \sqrt{v_1 + y_1^2}, \quad u_2 = \sqrt{v_1 + y_2^2}, \quad u_3 = \sqrt{v_2 + y_1^2}, \quad u_4 = \sqrt{v_2 + y_2^2}$$

式中, μ_0 为真空磁导率。

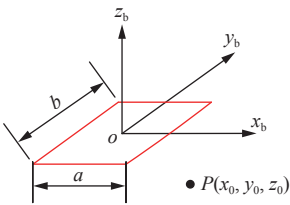


图 10 线圈结构示意图
Fig. 10 Coil structure diagram

磁传感器与电磁线圈之间的位置关系如图 11 所示。根据第 i 个采样点的线圈姿态 $(\psi_{\text{real}}(i), \theta_{\text{real}}(i), \varphi_{\text{real}}(i))$, 得到地理坐标系到线圈坐标系的转换矩阵 $C_{\text{g_real}}^{\text{b}}$ 。根据第 i 个采样点的线圈坐标 $(x_{\text{real}}(i), y_{\text{real}}(i), z_{\text{real}}(i))^T$, 得到地理坐标系下磁传感器相对于电磁线圈中心的矢径为 $(x_{\text{scg}}(i)=x_s - x_{\text{real}}(i), y_{\text{scg}}(i)=y_s - y_{\text{real}}(i), z_{\text{scg}}(i)=z_s - z_{\text{real}}(i))^T$, 转换到线圈坐标系下:

$$\begin{bmatrix} x_{\text{scb}}(i) \\ y_{\text{scb}}(i) \\ z_{\text{scb}}(i) \end{bmatrix} = C_{\text{g_real}}^{\text{b}}(i) \begin{bmatrix} x_{\text{scg}}(i) \\ y_{\text{scg}}(i) \\ z_{\text{scg}}(i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

在线圈坐标系下, 根据式 (3)~式 (5), 可计算出航迹第 i 个采样点上, 电磁线圈在磁传感器处产生的磁场 $B_{\text{b_real}}(i)$:

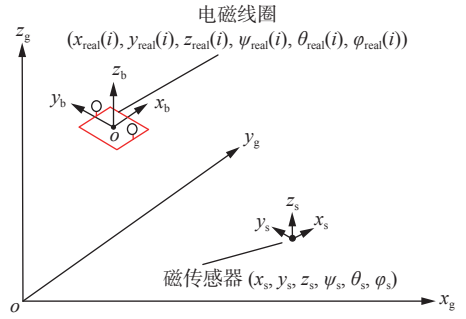


图 11 电磁线圈与磁传感器的坐标关系

Fig. 11 Coordinates system of coil and sensor

$$B_{\text{b_real}}(i) = \begin{bmatrix} B_{x_{\text{b_real}}}(i) \\ B_{y_{\text{b_real}}}(i) \\ B_{z_{\text{b_real}}}(i) \end{bmatrix} \quad (7)$$

转换到磁传感器坐标系下, 得到线圈磁场 $B_{\text{s_real}}(i)$:

$$B_{\text{s_real}}(i) = C_{\text{g_real}}^{\text{s}} \times C_{\text{b_real}}^{\text{g}}(i) \times B_{\text{b_real}}(i) \quad (8)$$

式中, $C_{\text{g_real}}^{\text{s}}$ 为由磁传感器姿态 $(\psi_s, \theta_s, \varphi_s)$ 得到的地理坐标系到磁传感器坐标系的转换矩阵。

图 12 和图 13 所示为轨迹 1 以及 2 的线圈磁场变化曲线。

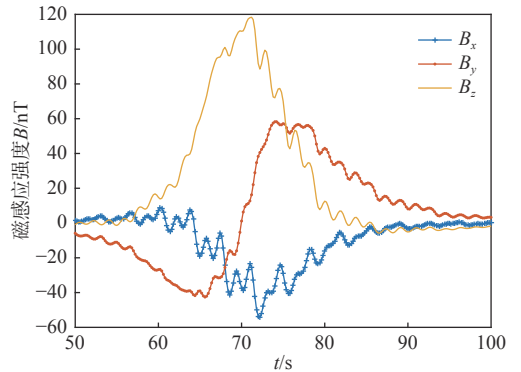


图 12 轨迹 1 上的线圈磁场值

Fig. 12 Magnetic field of coil in Trajectory 1

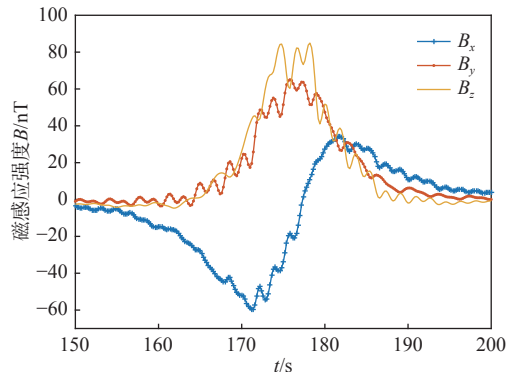


图 13 轨迹 2 上的线圈磁场值

Fig. 13 Magnetic field of coil in Trajectory 2

将地理坐标系下的地磁背景磁场通过 $C_{\text{g_real}}^{\text{s}}$ 转换到水下磁传感器坐标系下, 作为水下磁传感器的地磁背景磁场。

在线圈磁场数据 $B_{\text{s_real}}(i)$ 中加入水下磁传感

器处的地磁背景磁场和水中磁传感器的噪声和误差,作为线圈通电时磁传感器的磁场测量值。在水下磁传感器处的地磁背景磁场中加入水下磁传感器的噪声和误差,得到线圈断电时水下磁传感器的地磁背景磁场测量值。

将地磁监测传感器的系统噪声加入到地理坐标系下的地磁背景磁场,作为地磁监测传感器的地磁背景磁场测量值。

3.5 校准优化计算

将水下磁传感器的测量磁场减去其地磁背景磁场测量值的平均值,可得到线圈磁场测量值 $B_{s_meas_noise}(i)$ 。同样地,对地磁监测传感器测量磁场进行处理,得到地磁监测传感器测量的地磁环境波动值 $B_{g_mon}(i)$ 。根据线圈姿态数据 $(\psi(i), \theta(i), \varphi(i))$, 计算得到从地理坐标系到线圈坐标系的转换矩阵 $C_g^b(i)$ 。利用 $C_g^b(i)$ 将线圈位置数据 $(x(i), y(i), z(i))$ 转换到线圈坐标系后,采用式(3)~式(5),得到线圈磁场计算值 $B_{s_calc}(i), i=1, 2, \dots, n$ 。

将地磁监测传感器的地磁背景磁场测量值转换到水下磁传感器坐标系下,作为水下磁传感器处的地磁背景磁场测量值减去:

$$B_{s_meas}(i) = B_{s_meas_noise}(i) - C_g^s \times B_{g_mon}(i) \quad (9)$$

式中, C_g^s 为以磁传感器姿态为未知量计算的地理坐标系到磁传感器坐标系的转换矩阵。

采用最优化算法求解磁传感器位置姿态 $(x_s, y_s, z_s, \psi_s, \theta_s, \varphi_s)$, 在空间中搜索最优的磁传感器坐标和姿态点,使得根据该坐标和姿态计算的线圈磁场计算值 $B_{s_calc}(i)$ 与测量值(消除地磁波动) $B_{s_meas}(i)$ 之差的平方和最小。目标函数为:

$$f(x_s, y_s, z_s, \psi_s, \theta_s, \varphi_s) = \sum_{i=1}^n ((B_{xs_calc}(i) - B_{xs_meas}(i))^2 + (B_{ys_calc}(i) - B_{ys_meas}(i))^2 + (B_{zs_calc}(i) - B_{zs_meas}(i))^2) \quad (10)$$

式中: $B_{xs_calc}(i), B_{ys_calc}(i)$ 和 $B_{zs_calc}(i)$ 分别为磁场测量值 $B_{s_calc}(i)$ 在磁传感器坐标系下的磁场3个分量; $B_{xs_meas}(i), B_{ys_meas}(i)$ 和 $B_{zs_meas}(i)$ 分别为磁场测量值 $B_{s_meas}(i)$ 在磁传感器坐标系下的磁场3个分量。

当 $f(x_s, y_s, z_s, \psi_s, \theta_s, \varphi_s)$ 最小时,返回水下磁传感器的姿态方位优化计算值 $(x_{s_opt}, y_{s_opt}, z_{s_opt}, \psi_{s_opt}, \theta_{s_opt}, \varphi_{s_opt})$ 。

LM算法具有较好的全局收敛性,能够保证良好的计算精度^[18]。使用LM算法求解磁传感器的位置姿态 $(x_s, y_s, z_s, \psi_s, \theta_s, \varphi_s)$ 时,设置初始值为 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, -31 \text{ m}, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, 设置搜索范围为: $x_s \in [-50 \text{ m}, 50 \text{ m}], y_s \in [-50 \text{ m}, 50 \text{ m}], z_s \in [-100 \text{ m},$

$-5 \text{ m}], \psi_s \in [0^\circ, 360^\circ], \theta_s \in [-90^\circ, 90^\circ], \varphi_s \in [-180^\circ, 180^\circ]$ 。设置迭代次数为500次,收敛阈值为 10^{-8} 。为得到较为可靠的定位和定姿结果,对每种设备配置组合重复50次验证实验,计算得到磁传感器的位置姿态 $(x_{s_opt}, y_{s_opt}, z_{s_opt}, \psi_{s_opt}, \theta_{s_opt}, \varphi_{s_opt})$ 。

4 水下磁传感器校准结果

定义磁传感器位置真实值 (x_s, y_s, z_s) 和优化计算值 $(x_{s_opt}, y_{s_opt}, z_{s_opt})$ 之间的定位误差 e_s 为:

$$e_s = \sqrt{(x_{s_opt} - x_s)^2 + (y_{s_opt} - y_s)^2 + (z_{s_opt} - z_s)^2} \quad (11)$$

定义磁传感器姿态真实值 $(\psi_s, \theta_s, \varphi_s)$ 和优化计算值 $(\psi_{s_opt}, \theta_{s_opt}, \varphi_{s_opt})$ 之间的姿态误差 e_o 为:

$$e_o = \max(|\psi_{s_opt} - \psi_s|, |\theta_{s_opt} - \theta_s|, |\varphi_{s_opt} - \varphi_s|) \quad (12)$$

为观察不同精度配置对定位和定姿结果的影响,将定位误差和姿态误差制成区间图,如图14和图15所示。对比图14和图15中的误差,可以看出,L-H与H-H组合的定位和定姿精度及稳定性都要优于L-L与H-L组合,这表明水下磁传感器精度对定位和姿态误差影响较大;H-L与H-H组合在数据更新率为100 Hz时的定位和定姿误差与5 Hz时差别不大,这表明数据更新率对定位和定姿结果影响较小。

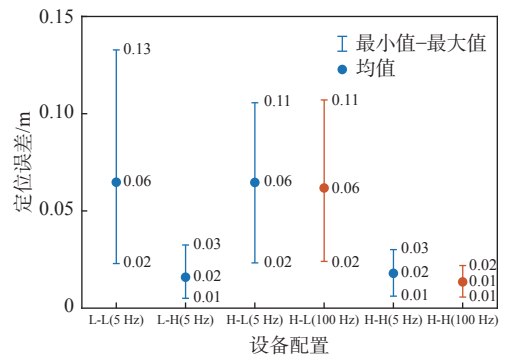


图14 不同精度配置组合下定位误差对比

Fig. 14 Comparison of positioning error under different precision combinations

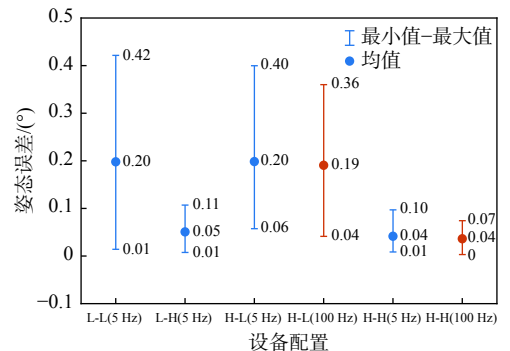


图15 不同精度配置组合下姿态误差对比

Fig. 15 Comparison of attitude error under different precision combinations

取各配置组合计算结果的均值作为定位误差和姿态误差的最终结果,如表4所示。可以看出不同设备配置下对水下磁传感器进行校准时,定位误差均值不超过0.06 m,姿态误差均值不超过 0.20° 。

表4 不同配置下的定位与姿态误差均值

Table 4 Mean value of positioning and attitude error under different precision combinations

数据更新率/Hz	设备配置/Hz	e_x/m	$e_y/^{\circ}$
5	L-L(5)	0.06	0.20
	L-H(5)	0.02	0.05
	H-L(5)	0.06	0.20
	H-H(5)	0.02	0.04
100	H-L(100)	0.06	0.19
	H-H(100)	0.01	0.04

5 结论

为实现水下磁传感器的位置和姿态的高精度校准,本文构建了一种基于电磁线圈和组合导航设备的校准装置设计方案,并建立了全系统的数学模型。在考虑组合导航设备的位置、航向、姿态参数,以及磁传感器的噪声、正交误差、线性误差、比例误差等参数和地磁场干扰影响的情况下,进行了数值验证实验。实验结果表明,所设计的校准装置能够实现水下30 m深度处磁传感器的定位误差均值不大于0.06 m,姿态误差均值不大于 0.20° ,能够实现水下磁传感器高精度的位置和姿态校准,可满足实际工程应用所需精度。磁传感器自身精度越高,校准效果越好。与现有的校准方法相比,所设计的校准装置能同时实现水下磁传感器定位和定姿,且充分考虑了地磁波动影响,更适用于姿态发生偏移的水下磁传感器校准。在之后的研究中,只需在设备上安装磁传感器,即可进一步将此校准装置应用于其他设备的定位定姿。

参考文献:

[1] 马伟明,张晓峰,焦依,等. 中国电气工程大典:第12卷-船舶电气工程[M]. 北京:中国电力出版社,2009:685-686.
MA W M, ZHANG X F, JIAO N, et al. China electrical engineering canon: Vol.12- ship electrical engineering [M]. Beijing: China Electrical Power Press, 2009: 685-686 (in Chinese).
[2] 林春生,龚沈光. 舰船物理场[M]. 2版. 北京:兵器工业出版社,2007:233-246.

LIN C S, GONG S G. Ships physical fields[M]. 2nd ed. Beijing: Ordnance Industry Press Co., Ltd., 2007: 233-246 (in Chinese).
[3] HOLMES J J. Modeling a ship's ferromagnetic signatures[M]. Cham: Springer, 2007: 1-3.
[4] 周炜昶,郭成豹. 通过式消磁站线圈系统仿真设计[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(5): 114-120.
ZHOU W C, GUO C B. Simulation design of coil system for overrun deperming station[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(5): 114-120 (in Chinese).
[5] 张安明,虞伟乔,郭成豹. 磁传感器阵列布置形式对铁磁目标磁场信息量获取的影响[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(1): 86-89.
ZHANG A M, YU W Q, GUO C B. The arrangement of magnetic sensor array impact on the information content of ferromagnetic object's magnetic fields[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(1): 86-89 (in Chinese).
[6] 郭成豹,胡松,王文井,等. 利用磁传感器阵列磁场差值的舰船磁场反演建模方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(1): 111-119.
GUO C B, HU S, WANG W J, et al. Ship magnetic field inversion modeling method utilizing the magnetic field difference between magnetic sensors[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(1): 111-119 (in Chinese).
[7] 郭成豹,殷琦琦. 舰船磁场磁单极子阵列法建模技术[J]. 物理学报, 2019, 68(11): 114101.
GUO C B, YIN Q Q. Magnetic monopole array model for modeling ship magnetic signatures[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(11): 114101 (in Chinese).
[8] 孙浩,赵伟. 磁传感器阵列技术及其应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 1-7.
SUN H, ZHAO W. Technical characteristics and applications of magnetic sensor array[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 1-7 (in Chinese).
[9] CHENG X Z, SHU H N, LIANG Q L, et al. Silent positioning in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1756-1766.
[10] CHENG W, TEYMORIAN A Y, MA L, et al. Underwater localization in sparse 3D acoustic sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2008: 236-240.
[11] 蔡艳辉. 差分GPS水下定位系统集成关键技术研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2007.
CAI Y H. Investigations on integration of underwater GPS positioning system[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007 (in Chinese).
[12] 窦雨芮,周其斗,纪刚,等. 声速剖面主导的浅海声传播最佳深度规律研究[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 102-113.
DOU Y R, ZHOU Q D, JI G, et al. Study on the influ-

- ence of sound speed profiles on the optimum depth of shallow water acoustic propagation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(5): 102–113 (in Chinese).
- [13] 郭成豹, 刘大明, 肖昌汉, 等. 一种磁传感器定位方法: 中国, 102928884[P]. 2015-07-22.
GUO C B, LIU D M, XIAO C H, et al. A positioning method of magnetic sensor: CN, 102928884[P]. 2015-07-22 (in Chinese).
- [14] 严恭敏, 翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019: 244–245.
YAN G M, WENG J. Strapdown inertial navigation algorithm & principles of integrated navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019: 244–245 (in Chinese).
- [15] 赵琳, 杨晓东, 程建华, 等. 现代舰船导航系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 35–36.
ZHAO L, YANG X D, CHENG J H, et al. Modern ship navigation system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 35–36 (in Chinese).
- [16] SHEINKER A, SALOMONSKI N, GINZBURG B, et al. Magnetic anomaly detection using entropy filter[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(4): 045205.
- [17] DAVIDSON S J, WEBB G J, WILKINSON P B, et al. Ranging in magnetically noisy environments[C]//Proceedings of Undersea Defence Technology Conference. London, UK: Nexus Media Limited, 1998: 215–220.
- [18] MORÉ J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]//WATSON G A. Numerical Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer, 1978: 105–116.

相关论文

- [1] 雷智洋, 王春旭, 吴崇建, 等. 预埋光纤光栅传感器的碳纤维复合材料螺旋桨水下动应变在线测试 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(2): 183–189, 205. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02323
- [2] 黄聪, 朱伟锋, 李迪. 基于爆炸声源的远程水下目标定位方法 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(6): 176–181. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01667
- [3] 潘孟琦, 董理君, 李晖, 范慧丽, 应文. 面向海洋传感器供能的船载能量网络参数配置技术 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(3): 129–134, 151. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01324
- [4] 赵大刚, 张顺, 高适, 钟祥海. 海流对水下航行器运动及载荷影响的研究综述 [J]. *中国舰船研究*. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.03572
- [5] 程朴, 覃慧玲, 蒲亮. 基于球形长周期光纤光栅的宽动态范围位移传感器 [J]. *中国舰船研究*. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.03278