

基于水下磁感应定位技术的研究

韩滨澧¹, 张晓明^{1,2}, 李欣甜¹

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对水下目标定位系统中发射信号端的位置不明确的问题, 提出三维正交线圈磁感应定位的方法, 以弥补单个线圈磁场信息较少的缺点, 有效解决单个线圈严重依赖轴线对准且无法实现空间定位的问题。建立了单个线圈和全向线圈的磁偶极子数学模型, 对磁感应强度的三分量值与其空间位置的几何关系进行分析, 通过仿真和试验验证了基于三维正交线圈的定位技术可行性。仿真和试验结果表明, 发射端坐标的相对误差分别为: X 轴为 6.70% 和 2.09%, Y 轴为 7.73% 和 5.64%, Z 轴为 8.74% 和 2.06%, 距离的相对误差在 7.0% 和 4.3% 以内。

关键词: 磁感应定位; 三维正交线圈; 磁场; 磁偶极子

中图分类号: TM937

文章编号: 1000-0682(2024)02-0086-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.015

Research on underwater magnetic induction positioning technology

HAN Binli¹, ZHANG Xiaoming^{1,2}, LI Xintian¹

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Shanxi Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measure, North University of China, Ministry of

Education, Shanxi Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the unclear position of the transmitting signal terminal in the underwater target positioning system, this paper proposes a three-dimensional orthogonal coil magnetic induction positioning method to make up for the shortcomings of a single coil with less magnetic field information, and effectively solve the problem that a single coil relies heavily on axis alignment and cannot realize spatial positioning. The magnetic dipole mathematical model of a single coil and an omnidirectional coil is established. The geometric relationship between the three-component value of magnetic induction intensity and its spatial position is analyzed. The feasibility of the positioning technique based on three-dimensional orthogonal coil is verified by simulation and experiment. The simulation and test results show that the relative errors of the launch target are as follows: X -axis is 6.70% and 2.09%, Y -axis is 7.73% and 5.64%, Z -axis is 8.74% and 2.06%, the relative error of distance is within 7.0% and 4.3%.

Keywords: magnetic induction positioning; three-dimensional orthogonal coil; magnetic field; magnetic doublet

0 引言

随着海洋开发技术的进步, 单自治无人潜水器

(Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 越来越难以完成复杂的军事和民用任务。因此, 多 UUV 协同系统在海洋探索、开发及军事作战等方面越来越重要。在复杂海域环境中, 水下通信已经成为实现协同作业的关键前提和核心技术^[1]。

在通信的基础上, 水下发射端目标的定位显得尤为重要。传统的无线通信技术主要是以声波和可见光为介质的通信技术^[2], 因此目前关于水下定位的研究所依靠的介质主要是声、光信号。文献[3]

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金, 中北大学面上项目“弹道模型约束的旋转弹药地磁/微陀螺组合测姿中的信息校准与融合”(61873247)

第一作者: 韩滨澧(1998—), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为无线磁感应通信与水下磁目标通信导航一体化。

E-mail: 2223947767@qq.com

提出了一种 TDOA 测量的方法,提高了定位性能;文献[4]提出了 p 阶割线的方法,提高了定位计算效率;文献[5]提出了一种基于水传播时差声通道的三维无源定位方案,利用周期三角形接收机阵列对目标声纳的声信号进行扫描;文献[6]指明光信号在水中急剧衰减,限制了其作为水下远距离定位的解决方案的应用。

但在水下多径环境中,因受到信道复杂、距离衰减快且伴随着多普勒效应和波折射、散射等影响,这些通信方式无法满足水下编队进行实时高速通信需求^[7]。而磁场没有多径模式,可以穿透不同介质或在介质边缘操作^[8],磁感应通信(magnetic induction, MI)技术作为一种新兴的通信技术,因其信道稳定、收发装置体积小、集群范围内高速率通信以及成本低等特点而备受关注。

三维正交线圈是一种基于电磁感应原理的传感器组成结构^[9],以其结构简单、制作方便、灵敏度高及抗干扰能力强等优点,逐渐成为研究发射端定位中的热点方案。这种传感器通常由 3 个正交的线圈组成,能够测量磁场中的 3 个分量,使得磁场的分布与其位置具有便于计算的几何关系,通过数学计算即可得出发射端的位置。

基于上述问题,该文主要着眼于对发射端目标的空间定位,建立相应的数学模型,针对高精度的发射端目标定位问题采用三维正交线圈的方法,通过 COMSOL 和 MATLAB 软件仿真发射端线圈的实际位置与估计位置以判断定位效果,最后分析定位误差原因。该方法在稳定性方面具有很大优势,可以捕捉到三维空间中的磁场信息,估计发射端的方向和位置,实现定位功能;通过调整发射线圈 3 路信号的相位还能够实现信号的高效稳定传输,为水下磁感应通信与导航一体化的实际应用提供有效研究价值。

1 磁感应定位数学模型

无线磁感应通信技术以法拉第电磁感应定律为基本原理,通过收发线圈之间的相互耦合实现信号传递功能。收发线圈通常由铜线绕制的圆环线圈组成,通过发射端的电流信号确定后,发射端周围的磁场在无外界干扰的情况下就会唯一存在^[10]。电磁感应线圈水下定位的数学模型如图 1 所示。图中发射端和接收端分别由 3 个正交线圈(C_{11} , C_{12} 和 C_{13} ; C_{21} , C_{22} 和 C_{23})组成,且分别垂直于坐标轴 X , Y , Z 和收发端之间的距离 d ,接收端与发送端之间的连线与坐标轴的夹角分别用 α , β 和 γ 表示。

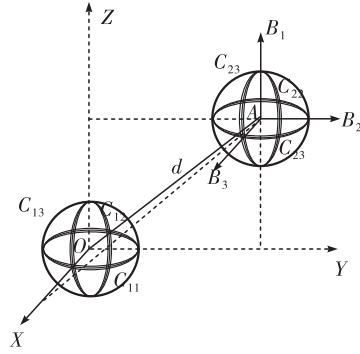


图 1 电磁感应线圈水下定位数学模型

1.1 磁偶极子模型

当信号发送端为通电线圈时,空间中的磁场分布数学模型主要为有限元积分模型和磁偶极子模型^[11]。文献[12]在医学领域测定探头在人体内的三维位置和姿态角使用的定位模型为有限元积分模型,定位距离较近,对发射端姿态与位置的精度要求更高。但当目标与磁源距离超过其自身长度的 2.5 倍时,可将该发射端看作是磁偶极子,且测距的准确度与前者基本一致,相对误差仅 0.030 5%^[13]。在水下环境进行定位时,收发端距离远大于线圈直径尺寸,又因磁偶极子模型具备计算相对容易且运算速率快等优点,因此该文采取磁偶极子模型进行水下磁感应定位分析。

由电磁感应原理可知,两线圈的轴线重合时能够使收发端产生相对较强的耦合,而相对方位偏移将导致耦合降低。由于水下环境存在着水流移动导致线圈节点的移动和旋转现象,两线圈的相对位置和方向可能会发生偏移,从而导致耦合程度降低,影响收发线圈之间的可靠通信。

考虑到发送端采用正交全向线圈只是对磁场进行了空间旋转,在一定距离外可看作为磁偶极子,相当于单组线圈发送信号,因此一般情况下,发送端只需分析单组线圈的磁感应分布。空间中任意一点 A 与其在 XOY 平面的投影点 A' 的空间几何位置如图 2 所示,由此建立的数学模型可以有效简化目标位置计算。

根据毕奥-萨伐尔定律^[14],在发射线圈中通入载波电流 $I_1 = I_0 \sin \omega t$,其中 I_0 为电流幅值, $\omega = 2\pi f$ 为加载电流的角频率,假设 $d \gg a_i$,则发送线圈在空间点 A 处所产生的磁感应强度为:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_A &= B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k} \\ &= \frac{\mu_0 I_1 S}{4\pi r^5} [3x_{xz} \cdot \mathbf{i} + 3y_{yz} \cdot \mathbf{j} + (2z^2 - x^2 - y^2) \cdot \mathbf{k}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: B_x, B_y, B_z 为磁感应强度 B_A 在 X, Y, Z 轴上的分量; $S_i = \pi a_i^2$ 为发射线圈面积, 单位为 m^2 ; 真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; i, j, k 分别为三轴方向的单位向量。

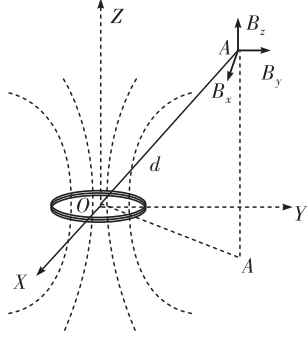


图2 单组线圈空间某点模型

由于磁场的可叠加性, N 匝线圈在空间中点 A 处的磁感应强度为:

$$\mathbf{B}_{AN} = \frac{\mu_0 N I_1 S_i}{4\pi r^5} [3xz \cdot \mathbf{i} + 3yz \cdot \mathbf{j} + (2z^2 - x^2 - y^2) \cdot \mathbf{k}] \quad (2)$$

根据式(2)所得到的磁感应强度空间分布模型呈发散状, 充满整个有限空间域, 利用 COMSOL 软件绘制的单组线圈磁场分布如图 3 所示。

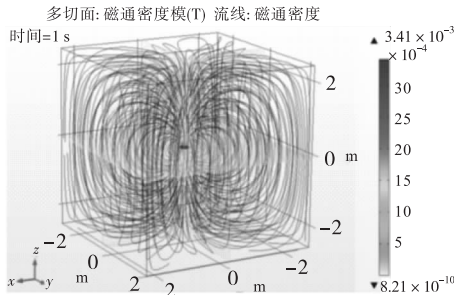


图3 单组线圈磁场图

1.2 三维正交线圈定位模型

接收端采用三维正交线圈时, 发送端通入一定的交变电流, 空间中任意一点的磁感应强度均由 3 个线圈的磁感应强度分矢量结合而成, 则发送端线圈 C_{11} 在空间中任意一点 A 的磁感应强度为:

$$B_{11} = \sqrt{B_{21}^2 + B_{22}^2 + B_{23}^2} \quad (3)$$

式中: B_{11} 为发送端源线圈在该点的磁感应强度值, 下标 $11x, 12x$ 和 $13x$ 分别表示感应线圈在该点的磁感应强度三分量值。

如图 1 所示, 点 A 的坐标值与夹角的关系满足:

$$\begin{cases} x = d \cos \alpha \\ y = d \cos \beta \\ z = d \cos \gamma \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$ 。

当磁感应强度 B_{11}, B_{12} 和 B_{13} 的值被测量已知后, 对应的角度关系为^[15]:

$$\begin{cases} \cos^2 \alpha = \left(\frac{x}{d}\right)^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{4\pi d^3 B_{11}}{\mu m_{11}}\right)^2 - \frac{1}{3} \\ \cos^2 \beta = \left(\frac{y}{d}\right)^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{4\pi d^3 B_{12}}{\mu m_{12}}\right)^2 - \frac{1}{3} \\ \cos^2 \gamma = \left(\frac{z}{d}\right)^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{4\pi d^3 B_{13}}{\mu m_{13}}\right)^2 - \frac{1}{3} \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_{1j} 为三维正交源线圈的磁矩, 其中 $j=1, 2, 3$, μ 为介质磁导率, d 为收发端之间的直线距离且满足 $d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

磁矩 m 的计算公式为:

$$m = N I S \mathbf{n} \quad (6)$$

式中: N 和 S 分别为线圈的匝数和面积; I 为载波电流; 单位矢量 \mathbf{n} 表示垂直于线圈平面的轴线, 矢量方向遵循右手定则。

联立式(4)和式(5)可推算出距离 d 的估计值为:

$$d = \left(3 \sum_{j=1}^3 \frac{8\pi^2 B_{1j}^2}{(\mu m_{1j})}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

通电线圈的磁矩主要与电流强度、匝数、线圈的形状和结构以及线圈材料有关, 假设三维正交源线圈的 3 个线圈的这些参数均相同, 则磁矩相同, 即 m_{1j}

$= m$, 令 $B_{AN}^2 = \sum_{j=1}^3 B_{1j}^2$, 则式(7)可以简化为式(8):

$$d = \left(\frac{3}{8}\right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{\mu m}{\pi B_{AN}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

通过探测接收端的磁感应强度值, 结合式(5)和式(8)即可得出发射端的距离以及夹角, 从而得出发射端线圈的坐标, 并判断所得值是否在预期卦限, 如果不在则标注当前数据为错误, 重新计算直到得出预期卦限的数据。

2 仿真结果与分析

采用 COMSOL 软件进行仿真试验, 绘制大半径为 0.1 m, 匝数均为 200 匝, 位于坐标原点的三维正交线圈作为接收端, 电流为 50 A 的通电线圈作为发射端, 坐标为 (x, y, z) , 在三维坐标系中, 取 $x, y, z \in [-500, 500]$, 三维磁感应磁场线分布如图 4 所示。

在限定空间内随机选取若干个坐标, 得出相应的磁感应强度, 再用式(5)和式(8)得出目标估计点的坐标, 将预期卦限的仿真定位坐标与真实坐标进行对比, 将对比坐标用 MATLAB 进行绘制, 对比结

果如图 5(a) 所示, 图中只截取 50 组结果; 将通过计算得到的收发端仿真定位距离与真实距离进行对比, 用 MATLAB 进行数据绘制, 对比结果如图 5(b) 所示。

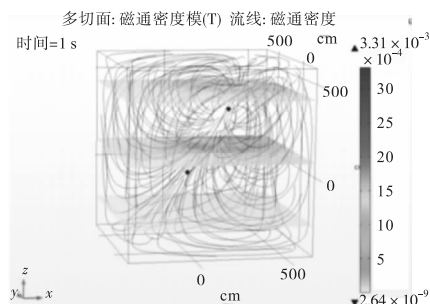
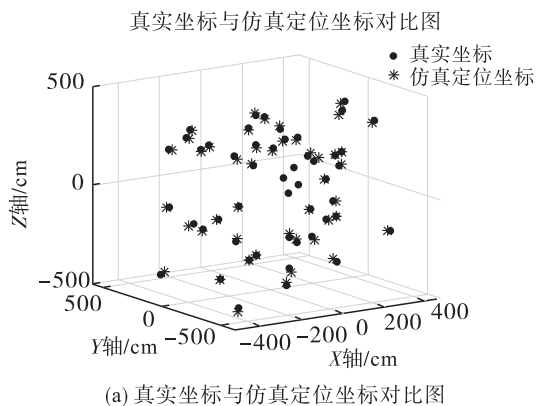


图4 三维正交线圈定位模型



(a) 真实坐标与仿真定位坐标对比图

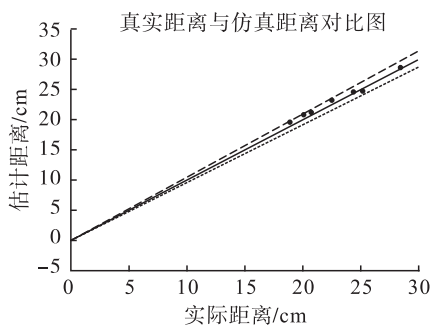


图5 坐标与距离对比图

通过仿真得到的磁感应强度计算定位坐标值 x, y, z 与真实取点的坐标值的相对误差分别为: X 轴为 6.7%, Y 轴为 7.73%, Z 轴为 8.74%。

仿真距离表示为 d' , 真实距离表示为 d , 图 5(b) 中, 中间直线表示函数 $d' = d$, 上下的直线分别表示函数 $d' = 1.07d$ 和 $d' = 0.93d$ 。由图 5(b) 可知, 仿真距离与真实距离的比值均分布在上下直线范围内, 即仿真距离与真实距离的相对误差在 7% 以内。

通过图 5(a) 和图 5(b) 数据可知, 随着收发端之间距离的增大, 仿真定位坐标与实际坐标误差也会增加; 通过三维正交线圈磁感应定位模型计算, 能够有效得到目标点的坐标和收发端之间的距离, 实

现至少 5 m 内的定位。

3 试验结果与分析

考虑到发送端采用正交全向线圈只是对磁场进行了空间旋转, 在一定距离外可看作为磁偶极子, 相当于单个线圈发送信号, 因此, 一般情况下, 发送端只需采用单个线圈进行信号的发送。在试验时, 选用铜线绕制半径为 2 cm、匝数为 12 匝的线圈, 分别通入 1.0 A、2.5 A 和 5.0 A 的电流, 以线圈中心为坐标原点建立坐标轴, Z 轴为轴线方向, X 轴和 Y 轴为径向方向。

利用磁通门测试空间中各个位置的磁感应强度, 得出磁感应强度三分量值, 图 6 所示为截取的部分试验线圈摆放位置。

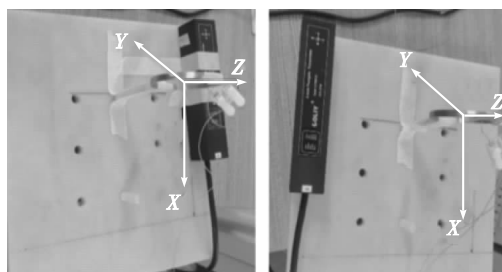
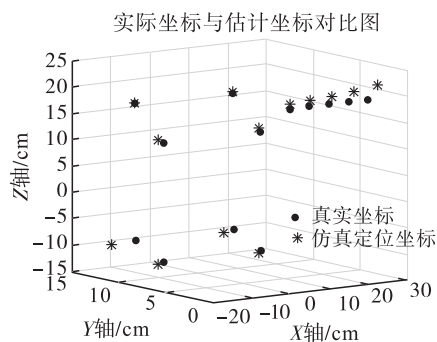
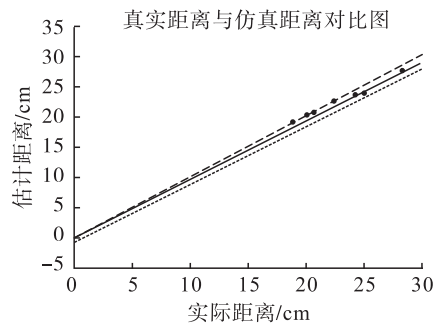


图6 部分试验线圈摆放位置

利用式和式计算出该点的估计坐标值, 与实际测量的坐标值进行对比, 坐标对比如图 7(a) 所示, 距离对比如图 7(b) 所示。



(a) 实际坐标与估计坐标对比图



(b) 实际距离与估计距离对比图

图7 试验坐标与距离对比图

通过磁通门得到的磁感应强度计算定位坐标值 x, y, z 与实际环境的坐标值的相对误差分别为: X 轴为 2.09%, Y 轴为 5.64%, Z 轴为 2.06%。仿真距离表示为 d' , 真实距离表示为 d , 图 7(b) 中, 中间直线表示函数 $d' = d$, 上下的直线分别表示函数 $d' = 1.043d$ 和 $d' = 0.957d$ 。由图 7(b) 可以看出, 仿真距离与真实距离的比值均分布在上下直线范围内, 即仿真距离与真实距离的相对误差在 4.3% 以内。

由于试验距离较仿真测试时的距离近, 因此误差相对较小。通过分析误差来源主要有:

(1) 磁偶极子模型不适用

当收发端距离较近时, 磁偶极子的计算模型可能不适用, 造成计算结果与实际值有较大误差, 当收发端距离较远时, 计算模型才适用。

(2) 实验环境引入的误差

实验中环境中的磁场无法保证维持不变, 导致数值上会有偏差, 磁通门传感器的探针位置造成的影响也会有细微差别, 同时, 将磁感应强度的三分量做平均处理时也是不够严谨的。

(3) 测量设备产生的误差

人工测量在试验环境中可能会引入误差, 采用丁字尺确定收发端线圈的实际坐标可能会偏离真实坐标, 由于实验环境与设备的有限, 很难做到收发端坐标与距离的高精度测值。

4 结论

该文针对水下环境的磁感应通信系统中发射信号位置不明确的问题, 提出采用三维正交线圈进行磁感应定位的方法。通过仿真和试验进行了坐标点和距离的验证, 仿真和试验结果表明, 发射端坐标的相对误差分别为: X 轴为 6.70% 和 2.09%, Y 轴为 7.73% 和 5.64%, Z 轴为 8.74% 和 2.06%, 距离的相对误差在 7.0% 和 4.3% 以内。由此可以得知, 三维正交线圈进行磁感应定位的方法可以有效解决单个线圈严重依赖轴线对准且无法实现空间定位的问题, 对磁感应通信的可靠性提供高效基础价值, 但精度仍需提升, 需要进一步研究和探讨。

参考文献:

- [1] 杨建, 罗涛, 王亚波, 等. 一种基于 CKF 的主从式多水下无人潜器协同定位方法: CN202011290377.7 [P]. CN112697145A [2023-08-21].
- [2] 王志强, 张美燕, 蔡文郁. 基于三维全向磁感应的水下定位技术研究[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2021, 41(02): 14-20.
- [3] LIU Y, WANG Y, CHEN C. Efficient underwater acoustical localization method based on TDOA with sensor position errors[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(4): 861.
- [4] YANG Wenlong, XUE Shuqiang, LIU Yixu. P-order secant method for rapidly solving the ray inverse problem of underwater acoustic positioning[J]. Marine Geodesy, 2023, 46(1): 3-15.
- [5] SUN X Y, LI N S, LIU X. Three-dimensional passive localization method for underwater target using regular triangular array[C]//Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA). 2019: 18584311.
- [6] PARK D, JUNG J, KWAK K, et al. 3D underwater localization using EM waves attenuation for UUV docking[C]//IEEE Underwater Technology (UT). IEEE, 2017: 16790553.
- [7] 潘东跃. 水下无线磁感应通信技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [8] 王一鸣, 谢旭. 协作式磁感应通信的线圈阵列优化设计[J]. 电波科学学报, 2022, 37(02): 304-313.
- [9] 余涛. 基于磁感应通信的水下目标探测技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [10] 窦胜月. 磁耦合谐振式电动汽车无线充电系统设计[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [11] HU Chao, FENG Zhongqing, REN Yupeng, et al. An efficient magnetic localization system for indoor planar mobile robot[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会. 第三十四届中国控制会议论文集(C卷). Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University; Taiyuan University of Science and Technology; 2015: 6.
- [12] 陈新, 林东, 张庆辉, 等. 磁场方式的内窥镜体内三维定位与追踪方法研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2002(05): 466-470.
- [13] BAO J M, HU C, LIN W X, et al. On the magnetic field of a current coil and its localization[C]//IEEE International Conference on Automation & Logistics. IEEE, 2012: 573-577.
- [14] 李建青. 用毕奥-萨伐尔定律计算磁偶极子的磁场分布[J]. 物理与工程, 2004(4): 14-15.
- [15] HUANG H, ZHENG Y R. Node localization in 3-D by magnetic-induction communications in wireless sensor networks[C]//OCEANS - Anchorage. IEEE, 2017: 18-21.