

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2005983

空间磁信标定位系统的信源结构设计*

王 润, 杨宾峰, 赵 震, 管 桦

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710000)

摘 要:磁信标导航定位系统的信源主要有永磁体磁信标和通电螺线管磁信标两种,基于毕奥-萨伐尔定理提出了锥形组合结构和平面交叉组合结构的永磁体磁信标设计方案,通过与现有的单永磁体信标及正交永磁体信标进行对比,得出锥形组合结构磁信标在与平面夹角为 70° 时产生的磁场信号性能最佳,在二维平面内能够明显提高信号的指向性;设计磁体夹角为 60° 的平面交叉组合信标,改善了现有信标存在信号盲区的问题并且提高了信号的传输距离。针对平面交叉组合旋转磁信标分析一元组合信标与二元阵列组合信标产生的磁场性能,仿真结果表明,在不同属性的传播介质中阵列布设信标产生的磁场信号鲁棒性更好。利用NdFeB永磁体材料搭建信号检测分析系统,在基线为5 m,信标旋转角度差值为0时,两种信标布设方法产生的最大误差分别为3.55 nT和5.80 nT,证明了所设计的磁信标结构的实用性,为磁导航定位系统的信号传输距离有限、信号提取困难等问题提供了有效地解决方案。

关键词:磁定位系统;磁信标;有限元分析;优化设计

中图分类号: TN966 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Source structure design of space magnetic beacon positioning system

Wang Run, Yang Bin Feng, Zhao Zhen, Guan Hua

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710000, China)

Abstract: The sources of the magnetic beacon navigation and positioning system mainly include the permanent magnetic beacon and the energized solenoid magnetic beacon. Based on Biot-Savart's theorem, a permanent magnet scheme with the tapered combination structure and the plane cross combination structure is proposed. The magnetic beacon design scheme is compared with the existing single permanent magnet beacon and the orthogonal permanent magnet beacon. The magnetic field signal performance of the conical combination structure magnetic beacon is best when the angle between two planes is 70° . And the directivity of the signal in the two-dimensional plane can be significantly improved. The plane cross-combined beacon with a magnet angle of 60° is designed to address the issue of the existing signal beacons and increase the signal transmission distance. The magnetic field performance generated by the unidirectional combined beacon and the binary array combined beacon is analyzed for the plane crossing combined rotating magnetic beacon. Simulation results show that the magnetic field signal generated by array beacons is robust in the propagation media with different attributes. NdFeB permanent magnet material is used to build a signal detection and analysis system. When the baseline is 5 m and the beacon rotation angle difference is 0, the maximum errors produced by the two beacon layout methods are 3.55 nT and 5.80 nT, respectively. It proves that the proposed magnetic beacon design has practical value. The standard structure provides an effective solution to the problems of limited signal transmission distance and difficult signal extraction of the magnetic navigation positioning system.

Keywords: magnetic positioning system; magnetic beacon; finite element analysis; optimization design

0 引 言

磁场信号具有丰富的参数信息,如磁场总量、地磁场三分量、磁倾角、磁偏角及磁场梯度等^[1],随着磁传感器技术^[2]和磁测量水平^[3]的不断提高,利用人工磁信标开展目标导航定位的技术方法逐渐成为该领域专家学者的研究热点。

磁信号的场强大小随着距离的增加呈幂次方衰减,因此磁信标的传输距离将直接影响到定位范围。目前,利用磁信标产生磁场主要有永磁体和通电螺线管两种^[4-5],通常会在通电螺线管中加入磁导率较高的铁芯以增强磁场强度。近年来,国内外诸多学者对磁信标的磁场分布特点进行了广泛的研究,取得了一定的成果,但由于磁场传输距离的限制,大多数磁信标的应用场合集中于医学中的细胞探测以及近距离的钻进导航定位系统中^[6]。Jonghwan 等^[7]开发了一种基于自组装磁性纳米粒子的分子信标(miR124a MR 信标),通过 T2 加权磁共振在神经元分化过程中监测哺乳动物细胞和组织中的 miR124a,通过 MR 体内成像监测 miRNA 介导的细胞调节过程,但作用距离仅限于细胞所处的环境。Sheinker 等^[8]为解决 GPS 在室内导航的不精确问题,设计了一种阵列磁信标,通过使用智能手机或 iPad 内部的磁场传感器对距其最近的磁信标进行定位,降低了磁信标的使用成本,但室内的通电线路及其他铁磁性装置的存在对定位系统造成的误差将不可估量。胡汉月^[9]在地下钻进领域的研究中对不同数量不同尺寸的磁单元进行了分析,提出磁单元集中在较短的信标载体长度范围内可保证磁分量的一致性与稳定性,邓国庆^[10]在此基础上对单个永磁体信标、组合永磁体信标及正交永磁体信标进行了详细的分析,得出组合使用的永磁体信标产生的磁场强度与单个信标的场强相近,且机械强度高,便于运输和使用。

为了解决磁信标产生的场强信号在信号强度和传输距离之间存在的矛盾,在满足定位系统中对信号可靠性的要求下,本文在对永磁体产生磁场信号原理分析的基础上,根据磁场信号发生及传输的基本理论,从磁信标的材料、结构、组合方法等多方面出发,对几种组合磁信标的磁场分布进行了分析和建模,使用 MATLAB 和 Comsol Mutiphysics 软件建立模型,仿真讨论了不同结构的永磁体的磁场分布,得到锥形组合信标在二维平面内具有良好的指向性,在空间定位系统中平面交叉组合信标作为磁信标更具优势。改变传输介质属性发现,各种结构的磁信标产生的磁场信号特征不因介质的改变而发生变化,这与磁信号的稳定性相吻合。使用 NdFeB 永磁体材料搭建磁场信号检测分析系统对不同布设方法的信标性

能进行分析,实验结果证明了交叉组合信标的实用性,且通过布设信标阵列可以有效拓展定位系统的作用范围,为磁信标定位系统的信源设计提供了良好的解决方案。

1 永磁体磁场信号产生原理

构成磁铁的磁分子是环形电流,所有的分子环流的电流方向一样,电流按照一定方向排列起来,在宏观上即显示出 N 极和 S 极^[11]。假设磁体内部分布着密度为 J 的电流,磁体表面分布着密度为 J_s 的面电流,当磁介质内部均匀时,内部任何两个相邻的分子环流的电流大小相等,方向相反,导致磁介质内部环形电流相互抵消,也即 $J = 0$,但磁介质横截面边缘还存在着电流并未抵消^[12]。因此,从宏观的角度考虑,磁介质横截面内的分子环流的矢量与沿截面边缘的一个环形电流等效的。一个场源产生的磁场经过介质后其磁感应强度的变化满足:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为磁场强度, A/m; $\mathbf{M}$ 为介质的磁化强度,为介质单位体积的分子磁矩矢量和, H/m。当磁介质未被磁化时,分子磁矩矢量和为 0,当介质被磁化时,介质内的分子磁矩沿磁化方向排列,分子磁矩矢量和不为 0。

在分子环流理论中,永磁体环形面电流密度与磁化强度满足:

$$\mathbf{J}_s = \nabla \times \mathbf{M} \quad (2)$$

而永磁体磁感应强度满足 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M}$, 因此 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\nabla \times \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{J}_s$, 根据安培定律可知,永磁体的磁感应强度与电流密度满足:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{\mathbf{J}_s \mathbf{R}}{R^3} ds \quad (3)$$

假设周围环境为真空即信号的传输磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 时,柱形永磁体(半径为 r , 长度为 h) 的中心位于坐标原点,磁偶极子的磁场分布及等效环流如图 1 所示,其磁矩方向与线圈电流的方向成右手螺旋关系,即为 Z 方向。

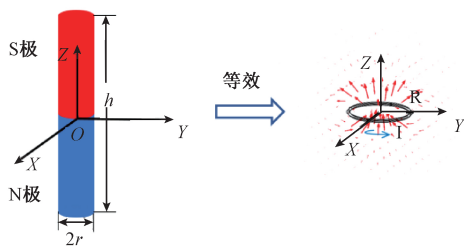


图 1 永磁体和等效磁偶极子坐标

Fig.1 Schematic of permanent magnet and equivalent magnetic dipole coordinates

磁介质的每一个磁分子都是由两个大小相等、极性

相反的磁荷组成的磁偶极子,根据安培环流定律分析,在磁偶极子模型下,当柱形永磁体位于坐标原点,且沿轴向

均匀磁化,其在空间任意一点 (x',y',z') 处产生的磁场三分量可表示为:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{B_r}{4\pi} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{-r}^r (z-z') \left\{ \frac{1}{[(x-r/2)^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{[(x+r/2)^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} dydz \\ B_y &= \frac{B_r}{4\pi} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{-r}^r (z-z') \left\{ \frac{1}{[(x-x')^2 + (y-r/2)^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{[(x-x')^2 + (y+r/2)^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} dx dz \\ B_z &= \frac{B_r}{4\pi} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{-r}^r \left\{ \frac{-(x-r/2)}{[(x-r/2)^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{x+r/2}{[(x+r/2)^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} dydz + \\ &\frac{B_r}{4\pi} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{-r}^r \left\{ \frac{-(y-r/2)}{[(x-x')^2 + (y-r/2)^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{y+r/2}{[(x+x')^2 + (y+r/2)^2 + (z-z')^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} dx dz \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $B_r = \mu_0 J$ 表示磁体的剩余磁场强度,单位为 T(特斯拉),并且总的磁场强度可以计为:

$$B_m = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (5)$$

根据文献[13],目前使用的烧结 NdFeB 永磁体牌号为 N48 至 N55 的各项参数如表 1 所示,根据地球平均地表温度为华氏 287 K,通过比较本文选取材料剩磁为 1.48 T 的永磁体作为仿真实验参数。

表 1 不同牌号 NdFeB 材料参数

Table 1 Material main parameters of different grades of NdFeB

牌号	剩磁/T	磁感矫顽力 /(A·m ⁻¹)	最大磁能 /MJGoe	工作温度
N48	1.38~1.42	860	366~390	≤80℃
N50	1.40~1.45	860	382~406	≤70℃
N52	1.43~1.48	796	398~422	≤70℃
N55	1.48~1.50	716	422~446	≤70℃

$$\begin{aligned} H_m + M &= \frac{B_r}{\mu_0 4\pi} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{-r}^r \left\{ \left[\frac{(z-z')^2 + (x-r/2)^2}{[(x-r/2)^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^3} - \frac{(z-z')^2 + (x+r/2)^2}{[(x+r/2)^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^3} \right] dydz + \right. \\ &\left. \left[\frac{(z-z')^2 + (y-r/2)^2}{[(x-x')^2 + (y-r/2)^2 + (z-z')^2]^3} - \frac{(z-z')^2 + (y+r/2)^2}{[(x-x')^2 + (y+r/2)^2 + (z-z')^2]^3} \right] dx dz \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: B_r 为磁体的剩磁; r 为磁体半径; l 为磁体高度; R 为测点距磁体的距离。

为满足导航系统中磁场信号的远距离传输,需要设计大尺寸永磁体,但永磁体体积越大,机械强度越低,当磁体长度超过 10 cm 时,信标成品压制困难且机械强度低,当长度达到 25 cm 时,造价昂贵,不适于普遍使用^[16]。因此,在实际生产和应用当中可设计永磁体的结构为 $r=1$ cm, $h=8$ cm,此时,圆柱形永磁体的尺寸因子为 4,退磁因子约为 0.1,磁体体积为 8π cm³,同时使用复合化学表面涂覆方法用以提高永磁体的特征机械强度。在磁导航定位系统中为增加远距离场强可将该尺寸结构的永磁体同磁化方向组合如图 2 所示。

分析单个永磁体沿轴向方向旋转时产生的磁场信

其中目前永磁体的制造形状有柱形、球形、方形、环形等^[14],综合考虑空间磁导航定位系统中对磁场信号的均匀性及稳定性的严格要求,本文选择对柱形永磁体信标作为信源结构进行分析。

2 磁信标及组合结构设计

考虑到当前永磁体的制造工艺、制作成本以及磁通门传感器的测量精度,为保证在 100 m 处的测量精度为 0.01 nT,在磁偶极子模型下,若永磁体沿轴向均匀磁化,对于沿轴向磁化的圆柱形永磁体,尺寸因子 $k=L/D$ (L 为磁体长度, D 为磁体直径) 过大会导致信标的退磁场较大,产生的磁场信号衰减更快,过小会使信标的机械强度减弱,缩短信标的使用寿命^[15]。根据磁场强度与磁感应强度的关系 $B = \mu_0(H + M)$,永磁体的远场分布可表示为:

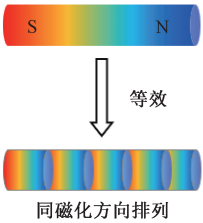


图 2 永磁体信标等效结构

Fig.2 Equivalent structure of permanent magnet beacon

号,发现在径向的部分空间磁场分布不均匀,存在信号盲区,这会导致系统的定位精度产生不确定误差,因此需要对其结构进行组合设计,分别讨论正交组合磁信标、锥形组合磁信标及平面交叉组合磁信标的磁场信号性能。其

中,3种组合磁信标的设计结构及旋转方向如图3所示。正交组合磁信标的两磁体呈轴向正交布设,一个磁体轴向沿 X 轴方向,另一个磁体轴向沿 Y 方向,两磁体分别沿轴向均匀磁化。锥形组合磁信标包含磁化方向沿各自轴线方向的3个磁体,顶点位于坐标原点呈倒四面体形,各个磁体的轴线方向在 XOY 平面内相差 120° ,与 XOY 平面的夹角为 θ ,由于锥形组合信标产生的磁场与角度 θ 有关,因此,在对3种磁信标性能进行比较之前,需要讨论 θ 角对信标性能的影响。平面交叉组合信标在 XOY 平面内同磁化方向交叉,同样需要对交叉角度进行分析。3种组合信标的旋转方向均为沿 Z 轴逆时针旋转。

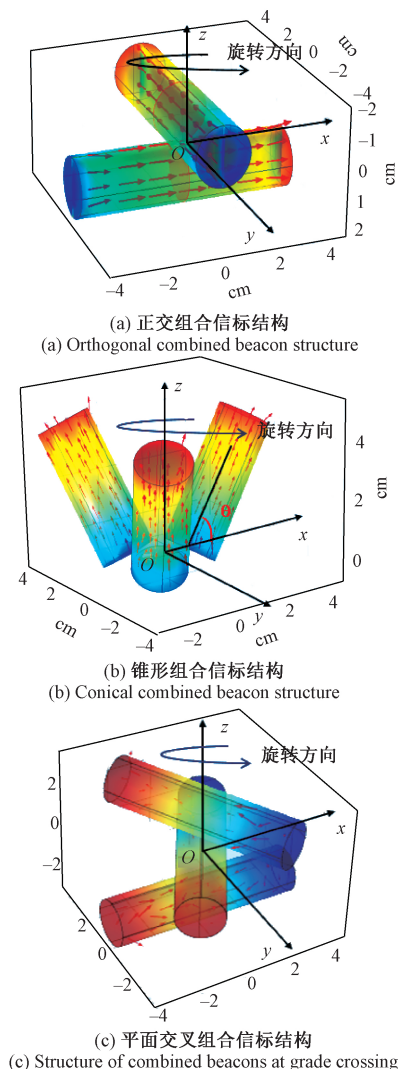


图3 3种组合信标结构

Fig.3 Schematic of three combined beacon structures

下面对3种组合永磁体磁信标的磁场分布进行分析,仍然设定磁信标为直径 $D=2\text{ cm}$,长度 $L=8\text{ cm}$ 的柱形永磁体。对于锥形组合磁信标分析 θ 角的大小对磁信标产生的磁场强度和磁场分布的影响,利用 Comsol

Mutiphysics 软件模拟该模型并设置锥形组合信标在真空中的旋转频率 $f=20\text{ Hz}$,对空间任意一点的磁场强度进行分析,提取具有代表性的一组数据如图4所示。

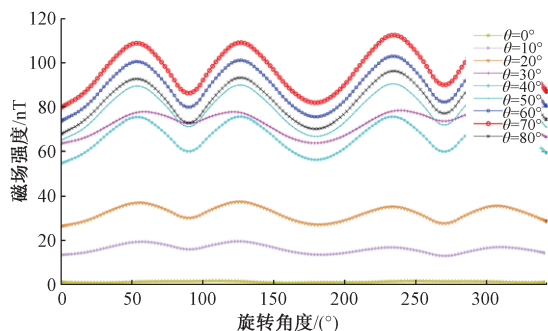


图4 锥形组合信标不同角度场强模拟

Fig.4 Field strength simulation of cone beacon at different angles

从仿真结果可以看出,锥形组合磁信标在空间内产生的场强与 θ 角呈非线性正比关系,这是因为信标的磁感线随 θ 角的增大而更加密集,当 $\theta=70^\circ$ 时,磁场信号的信号总场强达到最高,特征明显,更有利于特征提取。因此,对于锥形永磁体磁信标, θ 角为 70° 时能够产生良好的磁场信号值,可作为定位系统的信号源。考虑磁体同向相斥、异向相吸的原则,同时为了使得3个磁信标产生的磁场在空间更加均匀和对称地进行分布,设计平面交叉组合信标的3个磁体按照同磁化方向在 XOY 平面内分别成 60° 交叉。

3 旋转组合信标磁场信号测试与分析

磁信标产生的磁场信号在外部从N极出发回到S极,对于柱形磁信标其远距离轴向场强远远大于径向场强,当磁信标在某一固定频率旋转时,会在轴向产生2倍频率的正弦波信号^[17],由于一定区域内的背景磁场短时间内不会发生变化,在背景磁场未知的情况下,通过信号的特征频率提取信标旋转的过程中产生的正弦波信号,能够有效提高定位系统的时效性和鲁棒性。

考虑当前磁通门传感器的测量精度,利用 Comsol Mutiphysics 有限元分析软件搭建如图5所示的测试系统,对模拟得到的数据使用 MATLAB 进行处理分析,设计柱形永磁体 $D=2\text{ cm}$, $L=8\text{ cm}$,沿轴向均匀磁化。对比单永磁体磁信标、正交组合磁信标、锥形组合磁信标($\theta=70^\circ$)及交叉组合信标的磁场性能,为不同类型的磁信标施加相同的旋转频率 $f=20\text{ Hz}$,旋转方向同样为沿 Z 轴逆时针旋转。

在不受地磁场等背景磁场干扰的前提下,设置信号的传输介质为空气,提取空间中同一个方向下不同高

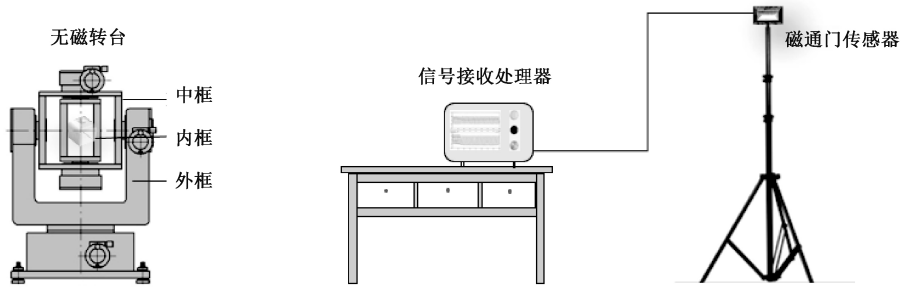


图 5 磁场信号产生与接收系统

Fig.5 Magnetic field signal generating and receiving system

度的波动信号的总场强,将仿真实验过程中获取的非线性离散信号通过多次拟合得到连续的信号波形,选取具有代表性的 4 组数据,其对比如图 6 所示。

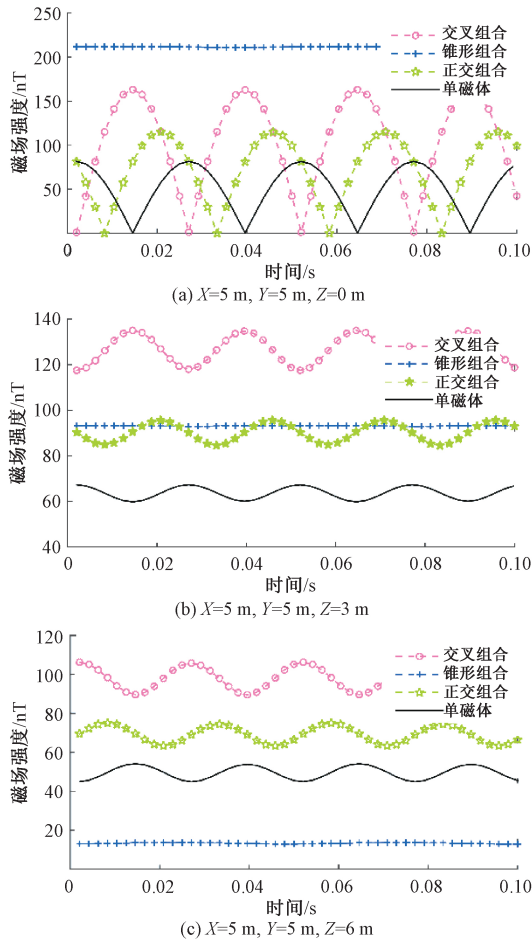


图 6 不同结构信标旋转产生场强波形

Fig.6 Magnetic field intensity generated by different rotating magnetic beacons

从图 6 可以看出,在不同高度交叉组合信标产生的磁场信号强度最高,正交组合信标、单永磁体信标依次降低,且交叉组合信标、正交组合信标、单永磁体信标产生

的正弦波信号频率相等,其波形不受信号提取点高度变化的影响。而锥形组合信标的磁场随信标的旋转始终处于稳定状态,场强在 XOY 平面内高于其他结构信标,随着信号传输高度的增加,信号的磁场强度逐渐降低,在高度为 6 m 时远远小于其他结构磁信标产生的磁场强度。综上所述,单永磁体信标在磁信标导航定位系统中,使用单永磁体信标的作用距离十分有限,可用于生物医学等定位范围小且信标体积有限的场合;使用锥形组合磁信标在二维平面磁信标导航系统中能够有效提高定位定向距离,在信标无法转动的特殊情况下依然适用;使用交叉正交组合信标明显提高了磁导航定位系统的作用距离,并在纵向及轴向提高了信标场强的指向性,相比其他结构的信标在同距离下使用则能提高磁信标的定位精度,适用于远距离、噪声干扰较强的磁信标导航定位系统。

4 阵列信标对不同近场的影响分析

磁信标在旋转过程中产生的场强信号随距离的增加呈幂次方衰减,可以通过增加信标的体积增加磁场强度,但需要克服磁信标的旋转过程中产生的机械应力问题。因此,可用小尺寸的组合磁信标组阵,通过场的合成方法增加一定区域内的磁场强度,本文对组合磁信标二元阵的特性进行分析。将两个组合永磁体沿 Z 轴放置,磁信标之间的距离为 d ,两个磁信标之间的初始旋转角的差值为 $\Delta\varphi$,在测量点 P 处的场强时,其距离每个磁信标的距离和角度均不相等,俯视图如图 7 所示。

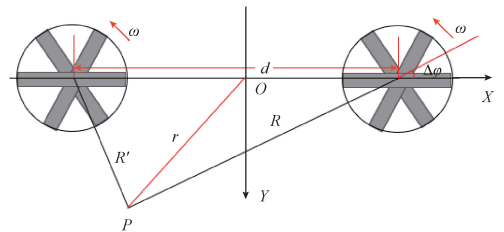
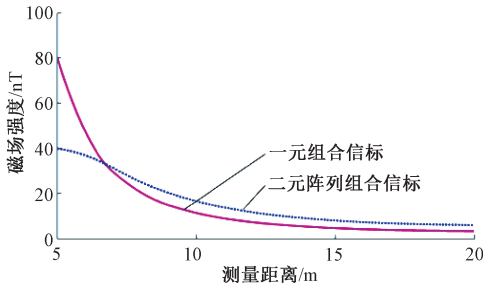


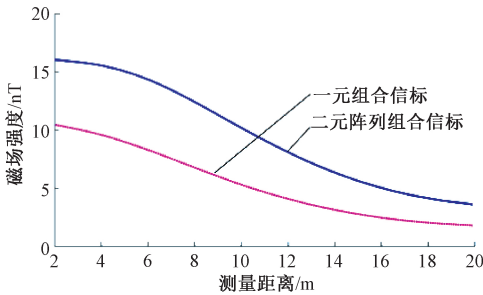
图 7 二元阵列旋转磁信标结构

Fig.7 Binary array rotating magnetic beacon structure

在同样的仿真条件下设定柱形永磁体的材料及结构,一元交叉组合磁信标位于坐标原点处,二元阵列交叉组合磁信标的坐标原点处于两信标连线的中点且两信标的间距 $d=5\text{ m}$, $\Delta\varphi=0^\circ$,两个组合磁信标同时匀速旋转,两种信标布设情况下的模拟旋转频率均为 $f=20\text{ Hz}$ ($\omega=40\pi$),分别在空气、土壤和海水3种不同的介质属性下测试一元组合磁信标和二元阵列组合磁信标在旋转过程中产生的场强变化情况。普遍情况下^[18]土壤的相对介电常数为 $\varepsilon_r=4$, 导电率 $\sigma=0.015\text{ S/m}$, 海水的 $\varepsilon_r=81$, $\sigma=4\text{ S/m}$, 3种介质的相对磁导率均约为1, 参考图7所示的坐标系,通过仿真模拟得到不同信标布设情况下信号的总场强度变化趋势如图8所示,不同传输介质中二元阵列组合信标产生的信号总场情况如图9所示。



(a) $X=0, Y=0$, Z 方向两种信标场强对比

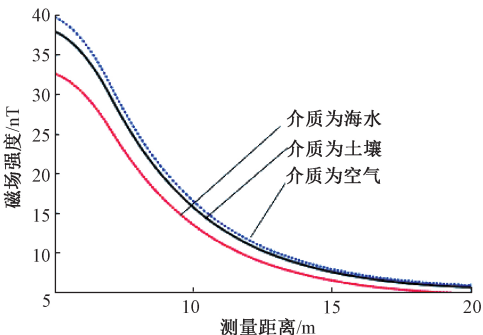


(b) $Y=0, Z=10\text{ m}$, X 方向两种信标场强对比

(b) Two beacons comparison of X direction under $Y=0$ and $Z=10\text{ m}$

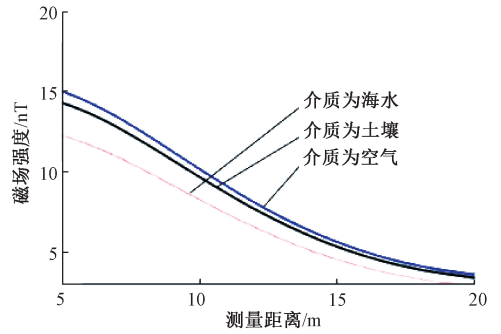
图8 两种信标布设不同方向产生的场强对比

Fig.8 Comparison of the field strength produced by two beacons in different directions



(a) $X=0, Y=0$, Z 方向二元阵列信标场强对比

(a) Binary array beacons comparison of Z direction under $X=0$ and $Y=0$



(b) $Y=0, Z=10\text{ m}$, X 方向二元阵列信标场强对比

(b) Binary array beacons comparison of X direction under $Y=0$ and $Z=10\text{ m}$

图9 阵列组合信标在不同介质中产生的场强对比

Fig.9 Comparison of field strength produced by array beacons in different media

可见一元交叉组合旋转磁信标在轴向近距离范围内的场强高于二元阵列组合旋转信标,而在测量距离大于7 m 及以上的区域二元阵列信标的总场强则高于单个信标的场强,且二者产生的磁场强度均随着距离的增大平稳衰减;在 $Z=10\text{ m}$ 的 XOY 平面上二元阵列组合信标产生的合成场强则始终高于单信标产生的磁场,综合分析可知在三维空间磁导航定位系统中使用阵列旋转组合磁信标产生的磁场信号可明显增加平面信号的传输距离,提高系统的定位定向距离和精度。

当改变介质属性时,同种信标的磁场信号在空气与土壤中的传播特性十分相似,而在海水中有所降低,分析原因在于海水中的化学元素含量丰富,导致介质磁导率发生变化从而影响信号强度,但在3种介质中的传播趋势基本一致,因此本文提出的信标设计方法在不同介质的磁导航定位系统中均可以使用。

5 实验验证及结果分析

考虑到无磁转台移动困难,将实验场所设置在空旷的室内,要求周围无发电机、变电箱或大型用电设备,以避免对磁力仪的测量造成影响。具体实验步骤如图10所示。

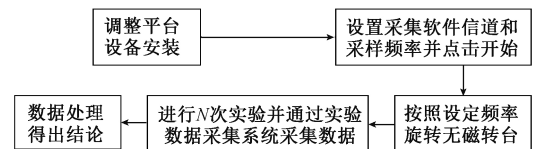


图10 实验步骤

Fig.10 Experiment step

采用交流市电对磁通门传感器供电将会引进未知的扰动和误差,为避免此类误差,采用稳压直流市电对信号

采集系统进行供电。实验系统中交叉组合信标每个 NdFeB 磁体的结构制作为 $D=10\text{ cm}$, $L=40\text{ cm}$, 为便于信标安装在磁体表面包裹厚度为 1 mm 的塑料绝缘层, 设置二元阵列信标的水平直线距离为 5 m , 传感器所处的测量点距离一元组合信标为 10 m , 测量高度为 5 m , 与二元阵列组合信标的连线中点同等距离。另外, 实验首先采用质子磁力仪测得实验场所的地磁场值为 $46\ 157\text{ nT}$, 为保证信号采集初值为 0 向量将采集到的信号总值降低该数值大小, 设置好的实验系统如图 11 所示。



(a) 无磁转台
(a) Non-magnetic turntable



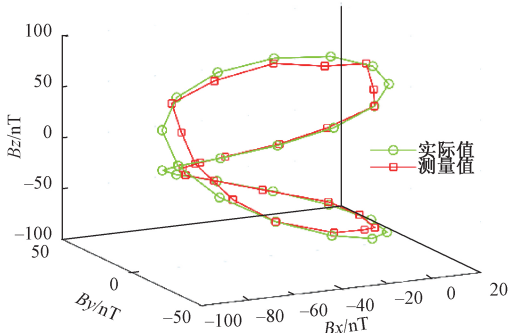
(b) 实验数据采集系统
(b) Experiment data acquisition system

图 11 实验系统
Fig.11 Experiment system

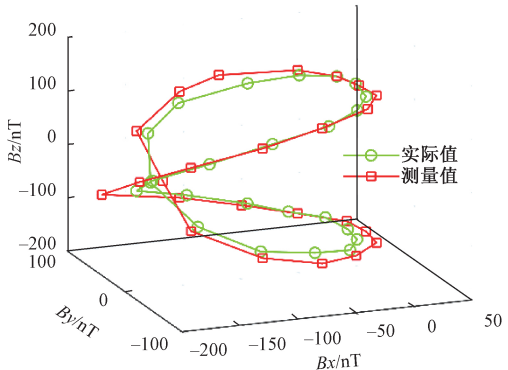
已知信标在静止状态产生的磁场信号会和周围的环境磁场信号相叠加为稳定场强, 而在旋转过程中会产生相应频率的波动磁场, 根据仿真实验设置同样的旋转频率并在空气介质中对信标磁场进行接收处理, 对比理论值和实际采样值得到如图 12 所示结果。

由图 12 所示的对比结果可知实际测量值与理论值波形相似, 其中, 二元阵列旋转组合信标产生的场强信号明显增强, 通过计算一元及二元阵列组合信标产生场强的最大均值分别为 40.04 和 67.21 nT , 且一元及二元阵列组合信标产生场强的测量值较理论值的误差分别为 3.55 和 5.80 nT , 分析原因在于实验中由于仪器的增加

会产生相应的固有误差以及信标组成阵列时工作不同步引起的测量误差, 因此在实际导航定位系统中需要对其进行误差补偿。



(a) 一元信标场强测试结果对比
(a) Unitary array beacons comparison of field strength test results



(b) 二元阵列信标场强测试结果对比
(b) Binary array beacons comparison of field strength test results

图 12 旋转信标场强测试结果对比
Fig.12 Comparison of field strength test results of rotating beacons

6 结 论

本文从分子环流理论模型和磁偶极子模型出发, 通过推导得出了永磁体外部空间任意一点的磁场强度计算公式, 通过利用 Comsol Mutiphysics 电磁分析软件对单磁信标永磁体产生的场强进行了模拟分析, 得出磁体在同磁化方向组合时与同等大小的单磁体信标产生的场强性能基本一致, 但在旋转过程中存在信号盲点的缺陷, 基于此提出 3 种信标组合方式, 并对锥形组合磁信标相对于水平面的夹角 θ 值进行了讨论分析, 得出 $\theta=70^\circ$ 时的锥形信标产生的信号总场强达到最高, 在导航定位系统中易于提取, 并设计交叉组合信标的交叉角度为 60° 。通过对不同组合结构磁信标的场强性能进行分析, 得出磁信标的磁场强度与信标个数呈非线性正比关系, 当其在固定频率旋转时, 交叉组合信标的磁场信号性能在各方面均优于其他组合信标。同时, 在不同属性的传播介质下

对比了一元交叉组合磁信标与二元阵列交叉组合旋转磁信标的磁场性能,得出阵列信标布设方法更利于远距离磁定位系统对信号的测量提取,所设计的信标结构在不同传输介质中均可使用,但在海水介质中的场强性能相对较差。最后在实验室环境下搭建了磁信号检测分析系统,对一元及二元阵列组合信标产生的磁场信号进行分析,实验结果与仿真结论相吻合。在实际工作中由于阵列布设信标时无法保证其完全同步旋转从而产生测量误差,接下来的研究工作中需要对该情况进行误差补偿并在实际磁导航定位系统中验证本文提出的信源结构的应用效果。

参考文献

- [1] 邱肖肖.多目标磁定位技术研究[J].哈尔滨工业大学学报,2019,1(1):33-36.
QIU X X. Research on multi-target magnetic positioning technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019,1(1):33-36.
- [2] FURUICHI T. Magnetic sensor and manufacturing method of the same[J]. Journal of Medical Sciences, 2017, 34(4):339-349.
- [3] LI R L, REN J, TIAN J R, et al. The application of ground magnetic measurement and borehole magnetic measurement to the exploration of the Lucaotan magnetite deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017(3):631-640.
- [4] TU B, LI D SH, LIN EN H, et al. Rotating magnetic beacons magnetic field strength size in SAGD[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2010, 5(4):446-449.
- [5] WANG M, HOU X CH, WIRAJA C, et al. Smart magnetic nanosensors synthesized through layer-by-layer deposition of molecular beacons for noninvasive and longitudinal monitoring of cellular mRNA[J]. ACS applied materials & interfaces, 2016, 8(9):122-131.
- [6] 张大成.基于磁信标的定位方法研究及其误差分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
ZHANG D CH. Research on magnetic beacon-based positioning method and its error analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [7] JONGHWAN L, HYO J K, BAHY A, et al. Magnetic resonance beacon to detect intracellular microRNA during neurogenesis[J]. Biomaterials, 2015(41):69-78.
- [8] SHEINKER A, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. A method for indoor navigation based on magnetic beacons using smartphones and tablets[J]. Measurement, 2016(81):197-209.
- [9] 胡汉月.人工磁导航定向钻进中靶系统研究[D].北京:中国地质大学,2009.
HU H Y. Research on target system in directional drilling with artificial magnetic navigation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [10] 邓国庆.基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位系统研究[D].武汉:中国地质大学,2017.
DENG G Q. Research on real-time positioning system of horizontal directional drilling based on ground magnetic beacons[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [11] MILLER J S, EPSTEIN A J. Organic and organometallic molecular magnetic materials—designer magnets[J]. Angewandte Chemie International Edition, 1994, 33(4):385-415.
- [12] WANG Y, LI X, ZHENG X, et al. Manipulation of spin and magnetic anisotropy in bilayer magnetic molecular junctions[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2018, 20(41):117-126.
- [13] 杨金波,韩景智,刘顺荃,等.新型永磁材料的研究[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2013,43(10):1188-1205.
YANG J B, HAN J ZH, LIU SH Q, et al. Research on new permanent magnet materials[J]. Science in China: Physics, Mechanics, Astronomy, 2013, 43(10):1188-1205.
- [14] 宋盼.地下磁导航系统的磁源设计[D].南昌:南昌航空大学,2010.
SONG P. Magnetic source design of underground magnetic navigation system[D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2010.
- [15] 李鑫.永磁体空间磁场分布规律及其在传感器中的应用[D].南京:南京师范大学,2015.
LI X. Spatial magnetic field distribution of permanent magnets and its application in sensors[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.
- [16] TONG W M, CI Y P. Study on rotor mechanical strength of high speed interior permanent magnet motor[J]. Electric Machines and Control, 2015(11):8-16.
- [17] 沙敏,王一帆,丁宁,等.电扫描实现旋转磁场跟踪仿真研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):1013-1020.

SHA M, WANG Y F, DING N. et al. Simulation research of rotating magnetic field tracking based on electrical scanning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014,28 (9): 1013-1020.

[18] 施伟,周强,刘斌.基于旋转永磁体的超低频机械天线电磁特性分析 [J].物理学报,2019,68 (18): 314-324.

SHI W, ZHOU Q, LIU B. Analysis of electromagnetic characteristics of ultra-low frequency mechanical antenna based on rotating permanent magnets [J]. Acta Physica Sinica, 2019,68 (18): 314-324.

作者简介



王润,2018 年于空军工程大学获得学士学位,现为空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为磁信标导航定位技术。

E-mail: 13289398095@ 163.com

Wang Run received her B.Sc. degree from Air Force Engineering University in 2018. She is currently a M.Sc. candidate at Air Force Engineering University. Her main research interests include magnetic beacon navigation and positioning.



杨宾峰,2002 年于空军工程大学获得硕士学位,2004 年于国防科学技术大学获得博士学位,现为空军工程大学副教授,主要研究方向为电磁检测与地磁导航新技术。

E-mail: bf_yang@ 163.com

Yang Binfeng received his M.Sc. degree from Air Force Engineering University in 2002, and received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2004. He is currently an associate professor at Air Force Engineering University. His main research interests include new technologies of electromagnetic detection and geomagnetic navigation.