

超低频机械天线通信模型及信号接收线圈研究

王晓煜¹,张雯厚¹,孙丽慧²,周鑫¹,曹振新³,全鑫³

(1. 大连交通大学机械工程学院, 辽宁大连 116028; 2. 航天工程大学, 北京 101416;
3. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏南京 211189)

摘要: 机械天线作为超低频通信技术,是当今国际瞩目的一个新兴研究领域,在远距离通信、水下通信等方面具有广泛的应用前景.为实现小型化和低功耗的超低频机械天线,提出旋转偶极子式机械天线结构和通信模型.针对提出的通信拓扑结构及通信信号辐射强度,研制三轴正交线圈作为信号接收单元.提出基于线圈热噪声电压与感应电压比值的灵敏度归一化表征方法.并对研制线圈的灵敏度及工况进行实验.实验结果表明:灵敏度理论模型可用于高灵敏度线圈设计,研制的空芯线圈可用于机械天线信号接收;铁制品的存在对线圈接收性能有影响.该实验研究为超低频机械天线接收线圈的优化设计提供理论参考.

关键词: 机械天线;超低频;通信模型;空芯线圈;灵敏度;信号接收

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)04-0824-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200254

Research on Super-Low Frequency Mechanical Antenna Model and Experimental Study of Magnetic Sensor Coil

WANG Xiao-yu¹,ZHANG Wen-hou¹,SUN Li-hui²,ZHOU Xin¹,CAO Zhen-xin³,QUAN Xin³

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China;

2. Aerospace Engineering University, Beijing 101416, China;

3. College of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: As a super-low frequency communication technology, mechanical antenna is a new research field attracting international attention. It has a wide application prospect in long-distance communication and underwater communication. In order to realize the miniaturization and low power consumption of the super-low frequency mechanical antenna, the structure and communication model of the rotating dipole type mechanical antenna are proposed. In view of the proposed communication topology and the radiation intensity of communication signals, a three-axis orthogonal coil is developed as a signal receiving unit. A sensitivity normalized characterization method based on the ratio of thermal noise voltage to induced voltage is proposed. The sensitivity and working condition of the developed coil are tested. The experimental results show that the sensitivity theoretical model can be used in the design of high sensitivity coils and the hollow coil developed can be used in the reception of mechanical antenna signals. The presence of iron products affects the receiving performance of coils. The experimental study provides a theoretical reference for the optimal design of the receiving coil of super-low frequency mechanical antenna.

Key words: mechanical antenna; super-low frequency; communication model; hollow coil; sensitivity; signal receiver

1 引言

超低频(30Hz~300Hz)电磁波在地~电离层波导内传播,对环境条件抗干扰能力强,传播稳定可靠,可广泛应用于远距离、地下和 underwater 通信以及定位等领域^[1].在实际应用中,超低频通信辐射单元均为电小天线,基

于电小天线电尺寸的限制,其工作波长极长(102km~105km),尺寸极大.

针对电小天线尺寸极大的问题,2016年12月美国国防高级研究计划局微系统技术办公室发布跨部门公告,2017年8月正式启动“机械天线”(A MEchanically Based Antenna, AMEBA)研制项目^[2].该项目指标中,天

线稳态工作时的时变磁场强度为 $1 \sim 100 \text{fT}@1\text{km}$, 而 fT 级的磁场强度信号非常微弱, 需要高灵敏度磁传感器进行接收。

当今磁传感器技术领域中, 主要有磁感应线圈、光泵磁力仪、超导量子干涉磁力仪等, 其分辨率最高可达到 pT 级^[3-6]。磁感应线圈因其结构简单, 功耗较低, 性能稳定, 分辨率高 ($\sim 50 \text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$) 等优点, 被用于机械天线接收单元^[7-9]。磁感应线圈作为测量元件, 不同模型的磁感应线圈, 对时变磁场的测量灵敏度范围也不同^[10-12]。因此, 线圈的精确设计至关重要。当前, 进行磁感应线圈设计时, 常采用经验公式进行近似估计进行标定。

为建立适用于超低频领域的磁感应线圈传递特性分析的准确数学模型, 国内外学者主要围绕等效电特性参数的精确计算、线圈信噪比和在低频领域可行性等方面, 做了大量有利的研究。

针对线圈的等效电感、等效电阻和等效电容的精确计算, Martinez 和北京工业大学的张晓东等人建立线圈几何参数与等效电感、等效电阻和等效电容的数学模型, 并通过实验验证了模型的准确性^[13,14]。但对等效电特性参数的研究主要集中在高频频段, 在超低频领域没有做详细讨论; 针对提高线圈信噪比方法研究, Slawomir Tumanski 对线圈不同缠绕方式的原理和特性进行分析, 提出综合考虑信噪比和灵敏度两个因素的线圈设计和参数优化方法^[15]; 张妙瑜提出一种新的 2 发射 1 接收共面子阵列结构, 以提高线圈的信噪比^[16]。针对线圈在低频领域可行性, Hunter C Burch 等人从理论和实验两方面分析了接收机的定位效应, 证明在频率低于 500Hz 和距离超过 100m 的情况下是可行和实用的^[17]。

超低频机械天线是一种新兴通信技术, 通过偶极子的机械运动辐射电磁场。基于全新的信号生成与无线电发射机理, 研制一种机械天线结构, 其结构主要包括信号发射模块和信号接收模块。基于信号发射模块, 对驻极体与永磁体等效模型的能量消耗进行比较, 选择能耗较低的永磁体作为辐射场源; 基于信号接收模块, 根据辐射场源强度, 选取线圈作为磁传感器接收信号。提出基于线圈感应电动势与热噪声电压比值的灵敏度归一化表征方法。基于灵敏度归一化模型, 研制符合机械天线通信要求的高灵敏度、高分辨率的三轴正交方形线圈。基于辐射场源与磁传感器, 搭建机械天线通信样机进行实验验证。通过实验验证灵敏度理论模型的准确性, 并对不同线圈测量误差进行分析, 使线圈灵敏度解析模型适用于各种空芯线圈设计。实现了线圈测量灵敏度范围的高精度预测, 为磁感应线圈的优化设计提供理论依据。基于磁感应线圈高分辨率, 设计铁制品对磁感应线圈接收性能影响实验, 研究铁制品的存在以及分布方式对线圈接收性能的影响, 为磁感

应线圈使用工况提供依据。

2 机械天线通信模型

2.1 机械天线结构

超低频机械天线通过永磁体或驻极体的机械振动产生信号, 实现超低频无线电波的发射, 驻极体或永磁体为机械天线核心辐射部件。驻极体通过对含有取向偶极子的功能电介质材料施加强电场, 并采用物理、化学方法使电荷或电极化状态长久地留驻在电介质上, 将其等效为如图 1 所示的电偶极子天线; 永磁体是在开路状态下能长期保留较高剩磁的磁体, 将其等效为如图 1 所示的通电线圈。

性能优异的驻极体如氧化硅 (SiO_2), 其等效面电荷密度达到 $3400 \text{nC}/\text{cm}^2$ 。截面为 0.001m^2 高度为 0.6m 的圆柱体 SiO_2 产生的电场相当于长度为 0.6m 的电偶极子驱动电流为 2A 、电压为 10MV 产生的电场, 但是电偶极子的功耗达到了 20MW , 具体如图 1 所示。性能优异的永磁铁如牌号为 N52, 材料为 NdFeB , 固有磁化强度达到 $1100 \text{kA}/\text{m}$ 。截面为 0.03m^2 , 高度为 0.1m 的圆柱体永磁铁产生的磁场强度等效为电流 333A 、 311 圈、功耗达到 221kW 线圈产生的磁场强度, 具体如图 1 所示^[2]。基于驻极体与永磁体等效模型的功耗, 超低频机械天线选择旋转永磁体实现信号发射。

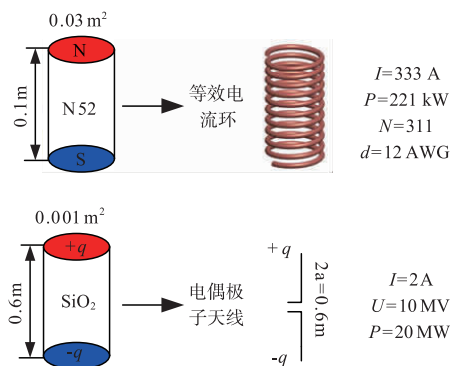


图1 永磁体/驻极体等效示意图

为更好控制驱动电机以及接收通讯信号, 提出一种如图 2 所示的机械天线结构, 该结构主要包括信号发射模块和信号接收模块。信号发射模块主要由辐射场源(永磁体)、驱动电机、功率转换器、控制器和信号发生器组成。信号发生器将通信所需信号传输到控制器和功率转换器, 控制驱动电机转速, 驱动辐射场源产生时变磁场。信号接收模块主要由磁传感器和前置放大器组成。磁传感器接收时变磁场信号, 通过前置放大器对时变磁场处理, 获取通讯信号完成机械天线通信。

2.2 机械天线通信拓扑结构

超低频机械天线辐射单元的信息加载通过永磁体

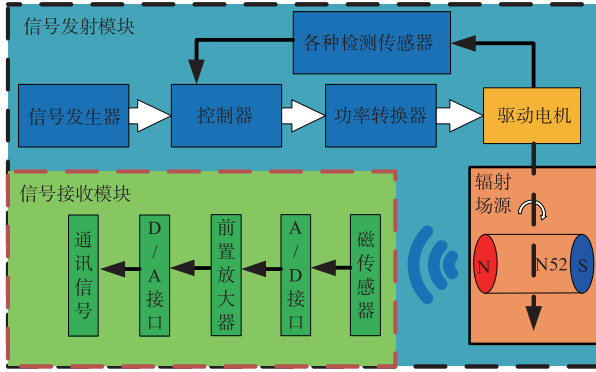


图2 机械天线结构示意图

的机械运动实现. 在这种运动状态下, 机械天线辐射单元仅需维持或改变其机械运动状态的能量, 利用较小的能量产生超低频电磁波实现信号发射. 接收单元的信息收集通过磁传感器对时变磁场的感应实现, 通过模数转换器完成发射信号的信息读取.

基于机械天线结构, 超低频机械天线辐射单元选取旋转永磁体辐射时变磁场, 旋转永磁体时变磁场强度为式(1)^[18,19], 其磁场辐射强度以通信距离的三次方衰减.

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) \\ &= \frac{\tau B_0 V e^{j(\sigma r - \omega t)}}{4\pi r^3} \left\{ -r(2\mathbf{j} + \sigma \mathbf{r}) \sin\theta + \right. \\ &\quad \left. \theta(\mathbf{j} + 2k\mathbf{r} - j\sigma^2 r^2) \cos\theta + \phi[-1 + \right. \\ &\quad \left. (2j\sigma r + \sigma^2 r^2) \cos^2\theta \right\} e^{j(\phi - \phi_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, τ 为永磁体形状参数, 其值见表1; B_0 为永磁体剩磁; V 为永磁体体积; r 为通信距离; θ 是极位夹角; σ 为波数; ϕ 为测试点与源点连接方向和正 x 轴方向之间的方位夹角; ϕ_0 为 y 轴与开始旋转处磁化方向之间的夹角.

表1 永磁体形状参数值

永磁体几何形状	形状参数值
长方体	1
圆柱体	1.7725

假设辐射单元中永磁体机械运动产生时变磁场领域研究范围为 1km, 即通信距离为 1km. 因此 $\sigma r \rightarrow 0$, 近区的磁场强度可表示为:

$$\mathbf{B}_{\text{near}} = \frac{B_0 V e^{-j\omega t}}{4\pi r^3} (-r2\mathbf{j}\sin\theta + \theta\mathbf{j}\cos\theta - \phi\cos^2\theta) e^{j(\phi - \phi_0)} \quad (2)$$

假设式(2)中参数 $\theta = 0$, $\phi = \frac{\pi}{2}$, 则式(2)可整理为

$$\mathbf{B}_{\text{near}} = \frac{B_0 V e^{-j\omega t}}{4\pi r^3} (\theta\mathbf{j} - \phi) e^{j(\phi - \frac{\pi}{2})} \quad (3)$$

从式(3)整理 \mathbf{B}_{near} 的幅值为

$$|\mathbf{B}_{\text{near}}| = \frac{B_0 V}{4\pi r^3} \quad (4)$$

辐射单元中, 选取永磁体材料为 NdFeB, 牌号为 N52, 剩磁为 1.38T, 尺寸为 $200 \times \phi 100\text{mm}$. 由式(4), 该旋转永磁体在 1km 处产生磁场强度为 125fT 的时变磁场. 因此, 实现机械天线通信接收单元中磁传感器分辨率需达到 $125\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 可检测磁场范围需 $< 125\text{fT}$.

当今, 常见磁传感器的可检测范围和分辨率如表2所示. 用于超低频时变磁场测量的最优磁传感器为超导量子干涉仪和线圈, 其中超导量子干涉仪的分辨率高于线圈, 具备良好的接收信号性能, 但其必须在接近 0K 的超导体临界温度下工作, 而用于军事通信领域的机械天线所处工作环境通常为室温. 所以, 使用超导量子干涉仪作为接收天线时搭建环境更为苛刻. 线圈结构简单、搭建方便、性能稳定, 对超低频通信环境要求较低, 方便搭建. 因此, 线圈作为超低频机械天线信号接收模块.

表2 各种典型磁传感器可检测范围及分辨率表

磁传感器	可检测磁场范围	分辨率
超导量子干涉仪	100fT ~ 100mT	$\sim 50\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$
线圈	$> 50\text{fT}$	$< 100\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$
磁通门	1nT ~ 1mT	$\sim 50\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$
光泵磁力仪	500fT ~ 1mT	$\sim 1\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$
巨磁阻传感器	$> 1\text{nT}$	$\sim 100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$
霍尔元件	1mT ~ 50T	$\sim 10\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$

由电磁感应定律, 线圈处于发射天线的时变磁场中, 线圈将产生同频率的感应电动势为式(5)^[20]. 基于线圈在其法向上最敏感, 机械天线信号接收采用三轴正交线圈, 通过 x 、 y 、 z 三个方向的分量确定空间任意方向时变磁场, 其时变磁场强度为式(6).

$$V_a = -N_a \frac{d\psi}{dt} = -N_a A_a \frac{dB}{dt} \quad (5)$$

式(5)中: N_a 为接收机线圈的匝数; A_a 为线圈截面面积; B 为磁感应强度; ψ 为磁通量.

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (6)$$

式(6)中: B_x 、 B_y 、 B_z 分别为空间三个方向时变磁场强度值, x 方向为在水平面上与旋转轴垂直方向; y 方向为与旋转轴重合方向; z 方向为竖直方向.

线圈作为机械天线信号接收装置, 常用结构有方形、三角形等形状. 不同结构线圈, 单匝线圈线长相同情况下, 其感应电动势不同. 为比较不同结构线圈的感应电动势大小, 引入如表3所示的线圈形状系数 c_1 , 对不同结构线圈面积与单匝线长进行统一计算, 其表达式为式(7).

$$l = c_1 \sqrt{A_a} \quad (7)$$

结合式(5)和式(7),单匝线长相同情况下,正方形线圈感应电动势最大.因此机械天线信号接收单元选择三轴正交方形线圈对时变磁场信号进行接收.

基于机械天线结构以及信号接收装置的研究,研制如图3所示的机械天线通信拓扑结构.该通信拓扑结构主要分为三部分,分别为辐射单元、传播路径和接收

单元.机械天线辐射单元通过信号发生器将要发射信号输送给变频器,通过变频器对电机转速控制,驱动永磁体转动激励电磁波.电磁波在空气或大地中传播,通过三轴正交线圈对时变磁场接收,三轴正交线圈产生感应电动势,通过示波器将感应电动势实现模数转换,将数字量信号传输到上位机对其处理,得到辐射单元发射信号实现通信.

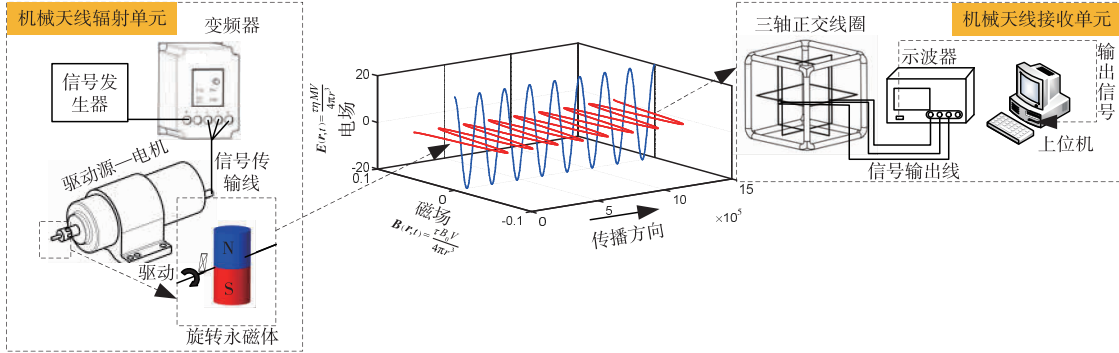


图3 机械天线通信拓扑结构图

3 磁感应线圈灵敏度归一化模型

超低频机械天线采用三轴正交方形线圈磁信号接收技术,能够研制达到通信需求的线圈是本研究的关键所在.线圈在时变磁场中,其感应电压表征检测信号的平均值,热噪声电压表征检测信号的最小值.因此本研究通过天线热噪声电压与时变磁场感应电压等效比值表征线圈灵敏度.建立基于天线热噪声与时变磁场感应电压比值的灵敏度归一化模型,为设计高性能磁传感器线圈提供理论依据.在实际通信中,灵敏度与通信距离有关.

3.1 时变磁场感应电压

根据线圈电特性参数的等效分布原理,空芯线圈等效谐振电路模型如图4所示.图中: V_a 为线圈的输出感应电压; R_a 为线圈的等效电阻,即构成该线圈的导线电阻; L_a 为感应线圈的等效电感,表示线圈本身固有特性,与电流大小无关; C_a 为线圈的等效电容,主要是线圈匝与匝间存在的电容.

旋转永磁体产生时变磁场为正弦信号,其输出感

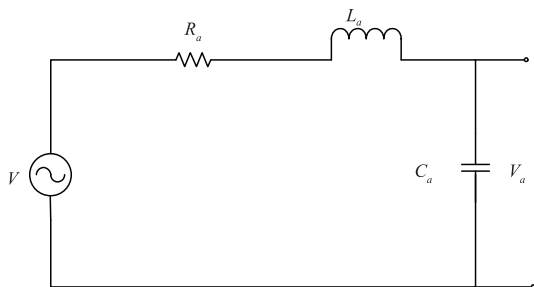


图4 空芯线圈等效电路图

应电压为

$$V_a = N_a A_a \omega B \cos(\omega t) = 2\pi f N_a A_a B \cos\theta \quad (8)$$

式(8)中: N_a 为线圈匝数; A_a 为单匝线圈面积; ω 为永磁体旋转角速度; f 为旋转永磁体工作频率; θ 为时变磁场入射方向与线圈轴线的夹角.当线圈轴线为水平方向时, θ 只表示接收机线圈的方位,其值为 0° .因此,可以忽略式(8)中的 $\cos\theta$.

由式(8)可知,影响线圈感应电动势因素为线圈匝数、线圈面积和辐射频率,且都呈正比.

3.2 热噪声电压

在超低频领域中,电磁波波长($10^3 \text{ km} \sim 10^4 \text{ km}$)远大于线圈宽度.因此,线圈的绕组分布电容和表面趋肤效应可以忽略不计,其等效电路如图5所示.

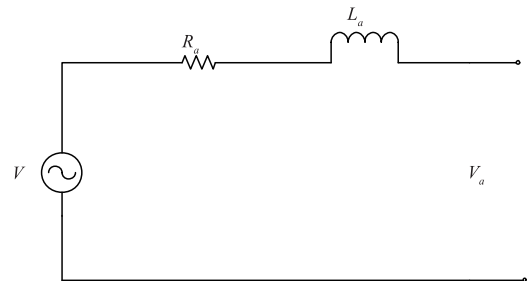


图5 超低频磁感应线圈等效电路图

根据电阻的定义,线圈电阻为 R_a

$$R_a = \frac{4\rho N_a l}{\pi d^2} \quad (9)$$

式中 ρ 为线圈电阻率; d 为线径.

由式(5)与式(9)联立整理得各种不同形状线圈的电阻 R_a 为

$$R_a = \frac{4\rho N_a c_1 \sqrt{A_a}}{\pi d^2} \quad (10)$$

各种形状线圈的电感 L_a 为

$$L_a = 2 \times 10^{-7} N_a^2 c_1 \sqrt{A_a} \left[\ln \frac{c_1 \sqrt{A_a}}{\sqrt{N_a} d} - c_2 \right] \quad (11)$$

式(11)中 c_2 为线圈几何相关的常数,不同形状下的值见表3.

表3 不同形状线圈形状系数与几何相关参数

线圈形状	c_1	c_2
正方形	4.000	1.217
等边三角形	4.559	1.561
等腰三角形	4.828	1.696

超低频领域中,电磁波的波长远大于线圈的边长,线圈辐射电阻值与自身阻值相比可以忽略不计.因此,检测信号的最小值由线圈电阻 R_a 产生的热噪声限制,线圈电阻 R_a 上的均方根热噪声电压 V_{Ni} 为

$$V_{Ni} = \sqrt{4kTR_a \Delta f} \quad (12)$$

式(12)中 k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ ws/K; T 为导体所处的绝对温度(K); Δf 为测量系统的噪声带宽;单位为 $V \cdot \sqrt{\text{Hz}}$.

由式(12)可知,影响线圈热噪声电压的影响因素主要为线圈电阻和噪声带宽.

3.3 磁感应线圈灵敏度

磁感应线圈灵敏度 S_a 定义为噪声密度的场当量,为线圈感应电动势与热噪声电压等效比值,即在 1Hz 带宽下的热噪声的磁场等效值.令 1Hz 带宽的均方根热噪声电压等于输出电压,得到磁感应线圈测量信号的磁场强度,即磁感应线圈灵敏度为

$$S_a = \frac{\sqrt{4kTR_a}}{2\pi f N_a A_a} \quad (13)$$

由式(13)可见,接收天线随着频率增大灵敏度增强,但频率是影响接收天线灵敏度的外在因素.机械天线通信时,带宽的存在导致相同结构线圈灵敏度发生改变.为研究相同结构线圈,在通信时灵敏度变化的影响因素,使线圈灵敏度计算归一化,归一化系数为 $1/f$.则线圈灵敏度归一化计算可整理为式(14),单位为 $T/\sqrt{\text{Hz}}$.

$$S_a = \frac{\sqrt{4kTR_a}}{2\pi N_a A_a} \quad (14)$$

式(10)与式(14)联立整理得磁感应线圈几何参数与灵敏度关系式为

$$S_a = \frac{\sqrt{4kT\rho c_1}}{\pi^{\frac{3}{2}} d \sqrt{N_a} A_a^{\frac{3}{4}}} \quad (15)$$

由式(15)可知,影响磁感应线圈灵敏度的因素主要由线圈自身决定,灵敏度 S_a 与线圈匝数 N_a 、横截面积 A_a 和线径 d 均存在相互关系.因此,在线圈外部尺寸允许的尺度内,可以增大线圈匝数 N_a 、横截面积 A_a 和线径 d 提高线圈的测量灵敏度范围.所以,磁感应线圈几何参数设计精度直接决定了线圈模型灵敏度的精确度.

4 线圈灵敏度与接收性能影响实验

基于机械天线通信结构和建立的接收线圈方法,对线圈灵敏度与线圈工况进行实验.实验搭建平台如图6所示.

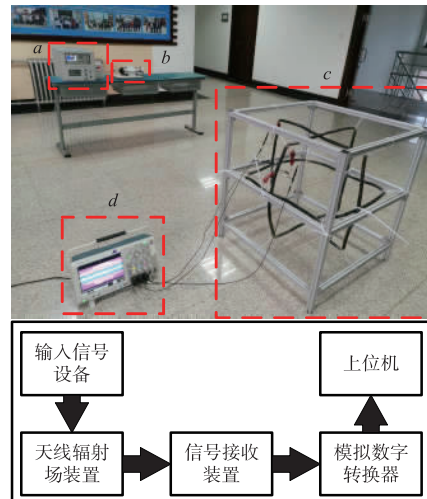


图6 磁感应线圈实验装置和方框图(a)信号输入装置,包括信号发生器和变频器;(b)辐射场设备,包括电机、夹具和永磁体;(c)信号接收器,由三个方形线圈和铝合金框架组成;(d)模拟数字转换装置:示波器

实验选取旋转永磁体作为机械天线辐射单元,研制阻抗为 $1\Omega\text{-mH}$ 的三轴正交方形线圈作为机械天线接收单元.实验工作频率为 75Hz,通信距离设置为 6m.辐射单元的永磁体选取材料为 N48,剩磁为 1.1T,尺寸为 $90 \times \phi 8\text{mm}$ 的轴向磁化永磁体;接收单元选取直径为 1mm 的铜线.

4.1 磁感应线圈灵敏度实验

由式(14)可知,磁感应线圈灵敏度主要受线圈匝数 N_a 和横截面积 A_a 的综合影响,通过实验,验证灵敏度归一化解析模型的准确性.实验装置如图6所示,利用单因素分析法分析线圈匝数和横截面积对其灵敏度的影响,分别改变线圈匝数和横截面积参数完成,其通信距离设置为 6m.令线圈阻抗为 $1\Omega\text{-}1\text{mH}$,根据式(10)和式(11),设计线圈 1、2、3.研究线圈横截面积对线圈灵敏度影响时,设计线圈 1 和 3,使其他参数固定,只改变线圈横截面积 A_a ($0.36\text{m}^2 \rightarrow 2.82\text{m}^2$);研究线圈匝数对线圈灵敏度影响时,设计线圈 2 和 3,使其他参数固定,只改变线圈匝数

$N_a(11 \rightarrow 22)$,线圈详细几何参数如表 4 所示.

表 4 实验线圈参数

参数	线圈 1	线圈 2	线圈 3
线圈匝数 N_a	21	11	21
线圈边长 (m)	0.6	1.68	1.68
线圈线径 (mm)	1	1	1
线圈形状	正方形	正方形	正方形
线圈阻抗	1.03	1.16	0.86

对于辐射单元,由式(4),旋转永磁体在 6m 处产生时变磁场强度理论值为 $1.03\mu\text{T}$. 对于接收单元,采用线圈 1、线圈 2 和线圈 3 分别对时变磁场进行测量,得到其在 6m 处的感应电压时域图,对时域图进行 FFT 变换得到频域图如图 7 所示. 由时域图得到感应电压有效值见表 5,频域图得到时变磁场工作频率为 75Hz,与电机转动频率相同. 由式(10),将各线圈感应电压有效值转换为时变磁场强度有效值,并与理论值对比,其结果如表 5 所示.

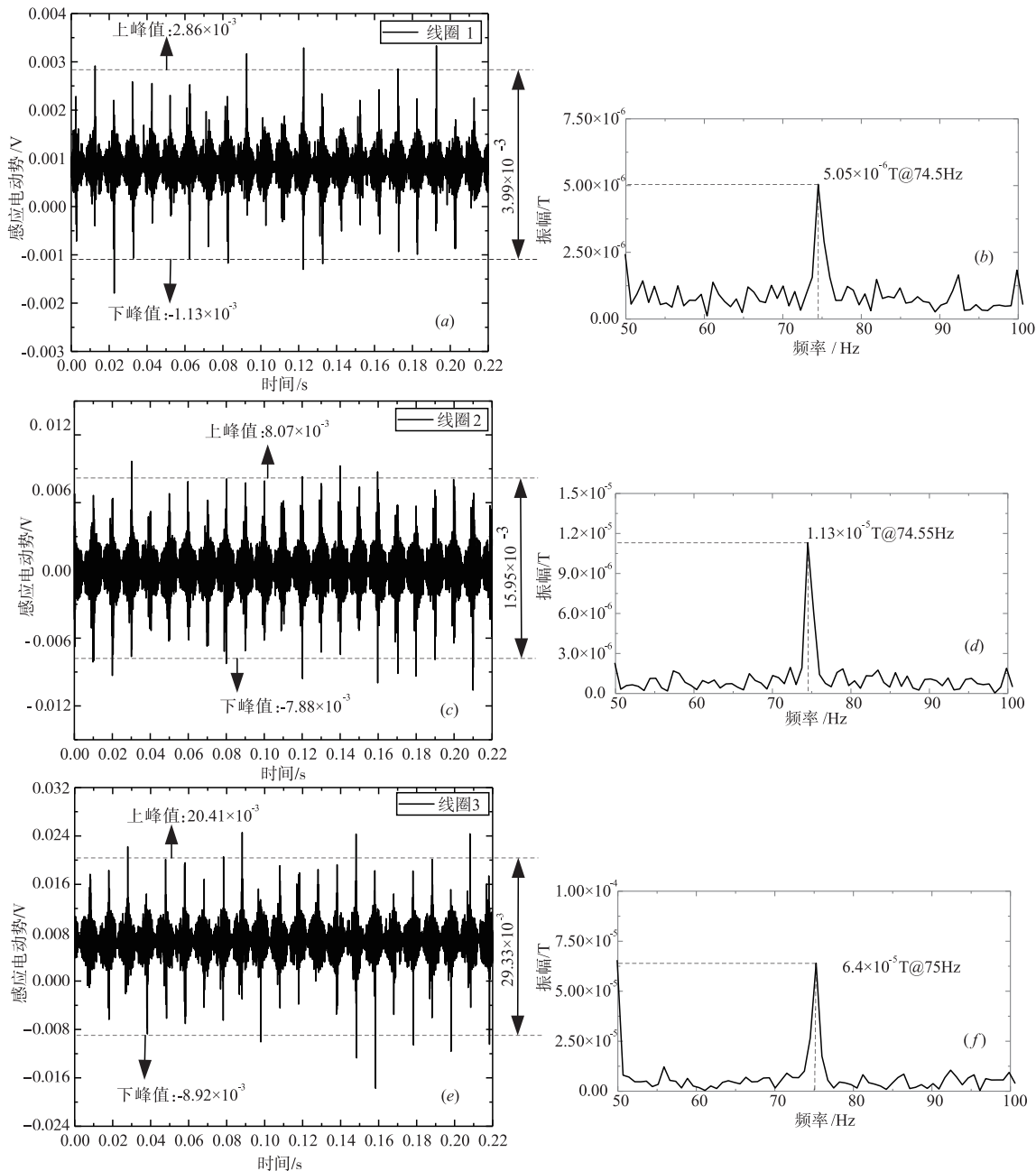


图 7 线圈感应电压时域与频域图(a)线圈1实测波形图; (b)线圈1实测波形FFT变换频域图; (c)线圈2实测波形图; (d)线圈2实测波形FFT变换频域图; (e)线圈3实测波形图; (f)线圈3实测波形FFT变换频域图

表 5 线圈感应电压与时变磁场强度有效值

线圈	感应电压有效值/mV	时变磁场强度有效值/ μT	时变磁场强度理论值/ μT	时变磁场强度误差/%
线圈 1	3.99	1.12	1.03	8.74
线圈 2	15.95	1.09	1.03	5.83
线圈 3	29.33	1.05	1.03	1.94

由表 5 中线圈 1 与线圈 3 实验值与理论值对比,线圈横截面积 A_s 从 0.36m^2 增大到 2.82m^2 ,对同一目标环境时变磁场测量误差降低 6.8%;由线圈 2 和线圈 3 实验值与理论值对比,线圈匝数从 11 增大到 21,对同一目标环境时变磁场测量误差降低 3.89%.因此提高线圈横截面积和匝数,可以提高线圈灵敏度.并且三种线圈的测量误差都小于 10%,证明线圈灵敏度归一化解析模型是正确的,可用于超低频机械天线磁感应线圈不同模型的设计.

4.2 铁制品对磁感应线圈接收性能影响

磁感应线圈作为高灵敏度磁传感器,检测旋转永磁体辐射场时,主要对时变磁场进行测量,而高磁导率的铁制品对磁感应线圈的接收性能产生影响.针对该问题,研究铁制品相对于磁感应线圈分布方式对磁感应线圈接收性能的影响.

实验装置如图 6 所示,接收单元选取线圈 1.基于铁制品与磁感应线圈相对位置不同,选取 4 块体积材料相同的铁块,其长宽高分别为 10cm 、 10cm 、 0.5cm ,与线圈相对位置如图 8 所示.图 8(a)为空芯线圈,作为对照实验;图 8(b)和 8(c)为周边分布,分别为四角型和四边型;图 8(d)、8(e)和 8(f)为中心分布,分别为竖直型、横向型和居中型.分别用以上 6 种线圈对时变磁场进行测量.辐射源与磁感应线圈中心距离为 l ,其范围为 $60\text{cm} \sim 400\text{cm}$,间隔为 20cm .通过不同线圈测量得到在不同距离处的时变磁场信号,对其信号用 Origin 进行 FFT 数据处理得到频域图,对其工作频率下的振幅进行记录并绘制如图 9 所示.

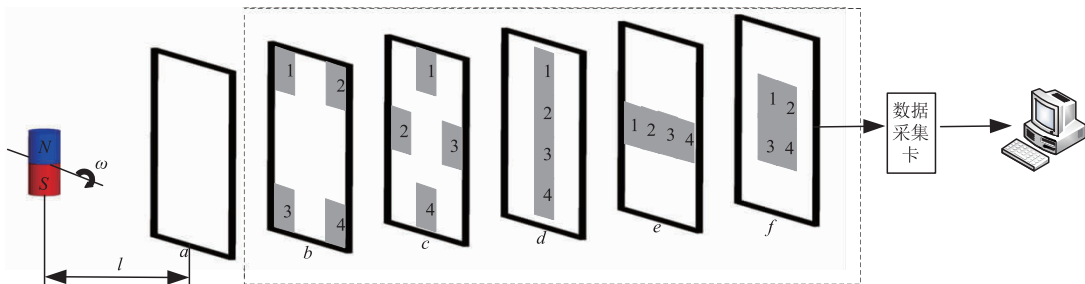


图 8 实验示意图以及线圈填充示意图

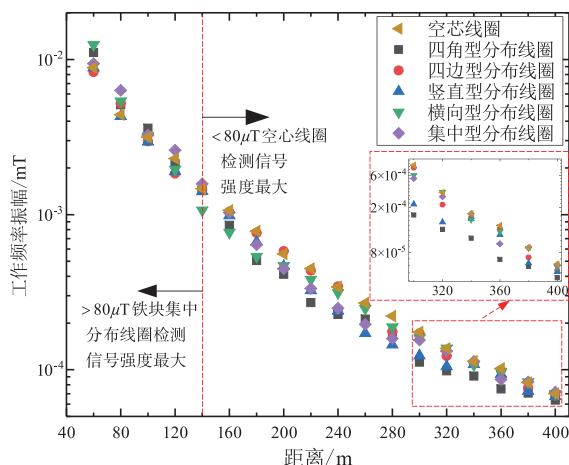


图 9 不同线圈信号强度数据图

由图 9 可以得到,线圈与发射单元距离为 $60\text{cm} \sim 140\text{cm}$ 时,四角型分布线圈检测信号强度最弱,居中型分布线圈检测信号强度最强,说明线圈检测磁感应强度大的时变磁场时,可采用铁块居中型分布线圈测量;在线圈与发射单元距离为 $140\text{cm} \sim 400\text{cm}$ 时,空芯线圈

检测信号强度最强,同时铁磁材料靠近线圈边缘比靠近中心对线圈检测信号能力消弱强.基于机械天线用于通信时的磁场强度在 $\text{pT} \sim \text{fT}$ 级,超低频机械天线磁感应线圈采用空芯线圈,且通信时尽量避免周围有铁制品的存在.

铁制品对线圈接受能力影响原因可能为:(1)铁磁材料给线圈传感器的传递函数引入一些非线性因素,这些因素与温度、频率、磁通密度等有关;(2)铁磁材料产生的磁噪声(如巴克豪森噪声)降低传感器的分辨率;(3)铁芯改变了被研究磁场的分布;(4)铁的电阻率低,在交变场中涡流损耗大.

5 结论

基于超低频机械天线通信,设计一种机械天线结构,搭建机械天线通信模型.基于信号接收模块,介绍了超低频磁感应线圈的设计方法,主要包括磁感应线圈灵敏度的分析以及归一化研究,并通过实验验证其准确性.基于上述理论和实验测试,主要结论有:(1)利用线圈几何参数和灵敏度归一化模型,设计三组线圈

对同一时变磁场测量,增大线圈匝数和横截面积都可以减小测量误差,且测量误差都小于 10%,验证增大线圈匝数和横截面积都可提高线圈灵敏度测量范围;(2)线圈灵敏度归一化模型可用于设计和构建各种形状阻抗为 $1\Omega\text{-mH}$ 的磁感应线圈.具有这种阻抗的任何形状线圈都可以与相同阻抗的变压器和放大器一起使用;(3)铁制品对超低频磁感应线圈接收性能影响实验验证测量微弱磁场时要采用空芯线圈,且线圈周围避免放置铁制品.通过本文研究将为超低频磁感应线圈的最优化设计和使用提供理论依据,保证获取检测信号的准确性.

参考文献

- [1] 蔺发军,刘成国,成思,杨玉萍.海上大气波导的统计分析[J].电波科学学报,2005,20(1):64-68.
- [2] 丁宏. DARPA 机械天线项目或掀起军事通信革命[J].现代军事,2017,1(4):71-73.
- [3] MAHDI A E, PANINA P, MAPPS D. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI material[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2003, 105(3): 271-285.
- [4] DING L H, SAEZ S, DOLABDJIAN C. Equivalent magnetic noise limit of low-cost GMI magnetometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(2): 159-168.
- [5] DUFAY B, SAEZ S, DOLABDJIAN C, et al. Impact of electronic conditioning on the noise performance of a two-port network giant magnetolmpedance magnetometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(6): 1317-1323.
- [6] 邵英秋,宋克非.宽频带感应式磁感应线圈电感的研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(7):703-709.
- [7] 吴德会,何天府,王晓红,黄一民.一种利用顶点形描述的任意正交折线线圈阻抗解析建模新方法[J].电子学报,2018,46(9):2094-2101.
WU De-hui, HE Tian-fu, WANG Xiao-hong, HUANG Yi-min. A new analytical modeling method for impedance analysis of arbitrary orthogonal polyline coils using vertex configuration description [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(9): 2094-2101. (in Chinese)
- [8] YAN B, ZHU W, LIU L, et al. An optimization method for induction magnetometer of 0. 1MHz to 1kHz [J]. IEEE Trans, 2013, 49(10): 5294-5300.
- [9] ZHAO P, JIANG Y Z, ZHANG S X, et al. Design of the magnetic field sensing system for downlink signal reception and interference cancelling for through the earth communication[J]. Journal of Magnetism, 2016, 21(3): 330-339.
- [10] 解伟男,奚伯奇,梁慧敏.非晶材料磁传感器噪声分析[J].仪器仪表学报,2012,33(11):2635-2640.
XIE Wei-nan, XI Bo-qi, LIANG Hui-min. Noise analysis of amorphous magnetic sensors[J]. Journal of Instrumentation, 2012, 33(11): 2635-2640. (in Chinese)
- [11] 潘仲明,周晗,张大厦,张文娜.国外巨磁阻抗传感器检测电路技术的发展动态[J].仪器仪表学报,2017,38(4):781-793.
PAN Zhong-ming, ZHOU Han, ZHANG Da-xia, ZHANG Wen-na. Development trends of giant magneto-impedance sensor detection circuit technology abroad [J]. Chinese Journal of Instrumentation, 2017, 38(4): 781-793. (in Chinese)
- [12] 师奕兵,罗清旺,王志刚,张伟,马东.基于多元接收线圈的管道局部缺陷检测方法研究[J].电子学报,2018,46(1):197-202.
SHI Yi-bing, LUO Qing-wang, WANG Zhi-gang, ZHANG Wei, MA Dong. A method for detecting local defects in pipelines based on multiple receiving coils [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(1): 197-202. (in Chinese)
- [13] MARTINEZ J, BABIC S, AKYEL C. On evaluation of inductance, DC resistance, and capacitance of coaxial inductors at low frequencies [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(7): 1-12.
- [14] 张晓东,吴斌,刘秀成,等.电磁感应线圈电特性研究[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3963-3970.
ZHANG Xiao-dong, WU Bin, LIU Xiu-cheng, et al. Research on the electrical characteristics of electromagnetic induction coils [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 39(13): 3963-3970. (in Chinese)
- [15] TUMANSKI S. Induction coil sensors: a review [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(3): 31-46.
- [16] 张妙瑜,郭宝龙,作杰.一种新型三分量共面线圈系结构研究[J].仪器仪表学报,2018,39(5):170-178.
ZHANG Miao-yu, GUO Bao-long, WU Jie. Study of a new three-weight coplanar coil structure [J]. Chinese Journal of Instruments, 2018, 39(5): 170-178. (in Chinese)
- [17] BURCH H C, GARRAUD A, MITCHELL M F, et al. Experimental generation of ELF radio signals using a rotating magnet [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, (11): 6265-6272.
- [18] Gong S, Liu Yu, Liu Y. A rotating-magnet based mechanical antenna (RMBMA) for ELF-ULF wireless communication [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2018, 72: 125-133.
- [19] 王晓煜,张雯厚,周鑫,曹振新,全鑫.旋转磁偶极子式超低频发射天线辐射特性研究[J].兵工学报,2020,41(10):2055-2062.
WANG Xiao-yu, ZHANG Wen-hou, ZHOU Xin, CAO Zhen-xin, QUAN Xin. Study on radiation characteristics

of rotating magnetic dipole type super-low frequency transmitting antenna[J]. Chinese Journal of Military Engineering, 2020, 41(10):2055-2062. (in Chinese)

[20] 殷春浩, 崔亦飞. 电磁测量原理及应用[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2008. 64-66.

作者简介



王晓煜 男, 1979 年生于辽宁大连, 现为大连交通大学机械工程学院副教授. 主要研究方向为智能材料与结构控制, 精密测试技术.
E-mail: 99925010@qq.com



张雯厚 男, 1993 年生于山西朔州. 现为大连交通大学硕士研究生. 主要研究方向为超低频天线小型化技术.
E-mail: 1075883762@qq.com



孙丽慧 女, 1977 年生于内蒙古多伦县, 现为中国人民解放军航天工程大学士官学校讲师, 主要研究方向为试验技术保障.
E-mail: yaoyaosunlihui@126.com



周鑫 男, 1994 年生于安徽安庆. 现为大连交通大学硕士研究生. 主要研究方向为超低频天线小型化技术.
E-mail: 654958081@qq.com



曹振新 男, 1976 年生于江苏南通. 现为东南大学教授、博士生导师. 主要研究方向为天线理论和应用.
E-mail: caozx@seu.edu.cn



全鑫 男, 1993 年生于河南南阳. 现为东南大学博士研究生. 主要研究方向为相控阵天线和基站天线.
E-mail: 15151868699@163.com