

# 基于驻极体材料的机械天线式低频通信系统仿真研究

崔勇<sup>1</sup> 王琛<sup>1</sup> 宋晓<sup>1</sup>

**摘要** 在海洋信息网络体系日益重要的现在,水下航行器越来越得到世界各国的重视,无论是在民用还是在军用上,都扮演着重要的角色.与水下航行器的通信主要采用的是能以较小的损耗深入海水的低频通信技术,而目前已有的低频通信系统发射台规模庞大,天线占地广、天线暴露、目标明显、战时生存能力差,极易被摧毁且难于短期修复,且所需功耗巨大.鉴于此,本文提出了一种基于复合聚合物驻极体纳米材料的机械天线式低频通信方法,从理论上研究了其产生的低频通信信号及计算公式,定量分析了其在正常工作时的功率损耗和在不同介质中的衰减,且在有限元分析软件中建立了相关模型进行仿真研究,并通过理论解析模型和多物理场有限元模型的双重仿真结果的一致性,以及仿真计算结果与机械天线样机的实测结果的对比,验证了所提方法的可行性.

**关键词** 海洋信息,水下航行器,低频通信,机械天线,驻极体,仿真建模

**引用格式** 崔勇,王琛,宋晓.基于驻极体材料的机械天线式低频通信系统仿真研究.自动化学报,2021,47(6):1335-1342

**DOI** 10.16383/j.aas.c190678

## Simulation and Analysis of Mechanical Antenna Low Frequency Communication System Based on Electret Material

CUI Yong<sup>1</sup> WANG Chen<sup>1</sup> SONG Xiao<sup>1</sup>

**Abstract** Nowadays, the marine information network system is becoming more and more important. Underwater vehicles are getting more and more attention from all over the world, which plays an important role in civil and military applications. Communication with underwater vehicles mainly uses low-frequency communication technology to penetrate seawater with less loss. At present, the low-frequency communication system has several disadvantages such as large scale, wide antenna coverage, exposed and obvious target, poor survivability in wartime, which is easy to be destroyed and difficult to repair in a short time, and requires huge power consumption. In view of this, a mechanical antenna low-frequency communication method is proposed based on composite polymer electret nanomaterials, analysis of the low-frequency communication signal and its calculation formula is made in theory, and the power loss and attenuation in different media are analyzed quantitatively. Finally, the relevant model is established in the finite element analysis software to carry out the simulation. The feasibility of the proposed method is verified by the consistency of the simulation results of the theoretical analysis model and the multi physical field finite element model, and the comparison between the simulation results and the measured results of the mechanical antenna prototype.

**Key words** Marine information, underwater vehicle, low frequency communication, mechanical antenna, electret, simulation modeling

**Citation** Cui Yong, Wang Chen, Song Xiao. Simulation and analysis of mechanical antenna low frequency communication system based on electret material. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(6): 1335-1342

收稿日期 2019-09-25 录用日期 2019-12-15

Manuscript received September 25, 2019; accepted December 15, 2019

“十三五”军委装备发展预研领域基金(61405180302),国家自然科学基金(51707006),北京市自然科学基金(4192033)资助

“13th Five Year Plan” Military Commission Equipment Development Pre-Research Field Fund (61405180302), National Natural Science Foundation of China (51707006), Beijing Natural Science Foundation (4192033)

本文责任编辑 段书凯

Recommended by Associate Editor DUAN Shu-Kai

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191

## 1 低频通信与机械天线

### 1.1 低频通信历史与现状

陆上、空中及空间航行器的位置测量和通信可以利用高频电磁波,但是由于电磁波的能量更容易被海水吸收,因此在电磁波衰减很快的水下环境中,水下航行器的定位<sup>[1]</sup>和通信一般应用低频电磁波来完成<sup>[2]</sup>.

而在低频通信发射系统中,发射天线是极其重

要的组成部分,其性能对于整个系统有着重要影响.现有的低频/甚低频天线通常采用电流振荡的形式发射电磁波,因此天线需要与馈线连接,通过馈线提供激励,使天线内形成电流振荡,完成振荡源输出电流与空间波场的能量转换,实现电磁波的空间辐射,进而通过接收天线将空间波场转换为接收回路电流.此时,对于低频/甚低频信号,由于频率低,波长很长,为获得理想的辐射效果,需要有相当于波长量级的大尺度发射天线.因此,采用传统天线实现方法需要建设巨大的发射天线系统,且对发射天线架设场地的地质条件有特殊的要求.

以美国的低频对潜通信电台为例,卡特勒甚低频长波电台位于缅因州,负责大西洋海域海军通信.该甚低频通信站天线系统中心天线桅杆高 304 m,输出功率为 1.8 MW;吉姆溪甚低频长波电台位于华盛顿州,负责太平洋海域海军通信.该低频通信站天线阵列由 10 个链状电缆线(1 719~2 652 m 不等)组成,输出功率是 1.2 MW.由此可见,目前已有的低频通信系统发射台规模庞大,存在着体积和功耗较大的问题<sup>[9]</sup>.

## 1.2 机械天线的发展趋势与研究现状

采用低频电磁波与水下航行器通信存在着技术挑战,最大问题是如何实现低频电磁波的有效产生,而利用传统激励源振荡电路的方式产生电磁波的低频天线,目前存在尺寸和功耗较大的问题<sup>[4]</sup>.针对此问题,国外已开展了相关研究,进行了大量的研究工作,以使天线的尺寸和功耗在不影响效率的情况下降低<sup>[6]</sup>.

2017 年 9 月美国 DARPA (美国国防高级研究计划局)斥资 2 300 万美金启动了为期 45 个月的“机械天线”计划(A MEchanically Based Antenna,编号:HR001117S0007),该计划拟通过机械装置驱动电场或磁场产生射频信号进行传播,可大幅度减少低频导航通信系统发射天线的体积和功耗,实现无线电发射系统的重大变革性和颠覆性创新.利用特低频(UHF)和甚低频(VLF)无线电波的优点,实现战略超远程、穿透性通信,以克服传统天线通信方式基础设施过于庞大,缺乏战略掩护等缺点.同时可以为陆军的超视距通信和地下通信提供支撑,显著减小现有低频通信设备的尺寸、重量和功耗.

对于机械天线项目,各研究机构纷纷响应,大多是从电磁波的产生原理入手,改变通过振荡电路产生电磁波的传统方式<sup>[6]</sup>,采用机械驱动电场或磁场变化的方式来产生交变电磁场,从而产生通信所需的低频电磁波.丁春全和宋海洋从经典电动力学

理论出发,对机械天线的理论基础—运动电荷和运动磁偶极子的辐射问题进行了分析和研究,推导了辐射场的数学表达式<sup>[7]</sup>.Prasad 等采用旋转永磁体的方法<sup>[8]</sup>,利用永磁体在旋转中会产生变化磁场的原理,来产生低频电磁波,也取得了较好的效果.并在此基础上将利用旋转磁体阵列<sup>[9]</sup>产生低频电磁波,并对其传播特性并进行了实验验证,采用体积为 0.1 m<sup>3</sup>,磁化强度为 0.1 T 的永磁体,在 X-Y 平面内绕 Z 轴旋转,当产生 100 Hz 的电磁波时,在距场源 400 m 处检测到了 100 fT 的磁场强度,证明该方法的可行性.Bickford 提出采用移动平行带电极板的方法产生低频电磁波<sup>[10]</sup>,即令带不同电荷的极板平行放置并相对运动,从而产生变化的电场来产生低频电磁波,并以此方法申请了美国专利.

而该项目立项初期就已经被中国多家新闻媒体报道,搜狐新闻网国防科技要闻频道认为该项目将统一美国战略部队(空军战略轰炸机、联队指挥部、战略机动指挥所和洲际导弹系统)通用甚低频通信技术,中国战略前沿研究中心将该项目列为 2017 年 DARPA 的最前沿四项技术之一(水下光纤通信网、小型低成本长航时无人机、机械天线、巷战无人机集群).目前国内对于该领域的研究较少,有相关专利“一种旋转驻极体式机械天线低频通信系统”(北京航空航天大学)<sup>[11]</sup>、“一种低频天线”(武汉船舶通信研究所)<sup>[12]</sup>和“基于声学驻波谐振结构的小型化低频/甚低频发射天线”(西安电子科技大学)<sup>[13]</sup>.2018 年 2 月我国针对海军用的低频通信领域发射系统结构复杂、体积庞大的问题,将“机械天线技术”列入了 2018 年海军装备预研创新项目.

然而,目前对于机械天线项目的研究大多是基于驱动永磁体,而永磁体的重量和体积过大,需要消耗较多的能量来驱动,复合聚合物纳米材料驻极体与永磁体相比,具有质量轻且易于加工等特点,因此本文选取驻极体来实现机械天线所用电荷的贮存.鉴于此,本文研究了一种在驱动机械装置上使用极化聚合物驻极体的超低频(UHF/VLF)信号发射天线,同时采用磁场传感器接收信号的机械天线式低频通信方法,并从理论解析、仿真建模和实物测量三个部分验证了本文方法的有效性和可行性.

## 2 机械天线解析模型

### 2.1 整体结构

本文所研究的基于复合聚合物驻极体纳米材料的机械天线式低频通信方法整体结构图如图 1 所示.低频电磁波产生模块(图 1)主要由驻极体圆盘

和驱动电机组成. 通过电晕放电技术, 让放电尖端均匀的在驻极体表面放电, 并在放电一段时间后, 改变电荷种类, 使驻极体一部分带均匀的正电荷, 另一部分带均匀的负电荷. 而驻极体是弛豫时间较长的处于亚稳态极化了的电介质<sup>[14]</sup>, 跟其他电介质不同, 驻极体受强外电场作用后其极化不随外电场去除而完全消失, 出现极化电荷“永久”存在于电介质表面和体内的现象, 因此驻极体能够长期储存偶极电荷或空间电荷 (包括表面电荷和体电荷). 同时, 驻极体具有体电荷特性, 不同于摩擦起电, 既出现在驻极体表面, 也存在于其内部. 若把驻极体表面去掉一层, 新表面仍有电荷存在; 若把它切成两半, 就成为两块驻极体. 这一点可与永久磁体相类比, 因此驻极体又称永电体, 而若采用多层驻极体结构可以存储更多电荷<sup>[15]</sup>.

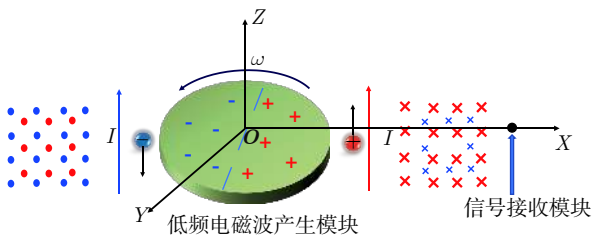


图 1 驻极体式机械天线结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electret mechanical antenna structure

然后通过机械天线中的电机, 驱动带电驻极体一同绕几何中心旋转, 从而形成变化的低频电磁场, 产生交变低频磁场信号. 再将所需通信信号加载于低频磁场信号上向接收方向发射<sup>[16]</sup>, 同时采用高精度高灵敏度微弱磁场传感器<sup>[17-18]</sup>接收混合磁场信号, 最后通过解调混合磁场信号得到所需通信信号完成低频无线通信过程.

当带电驻极体的角速度方向为垂直纸面向外, 即带电驻极体绕圆心所在的轴线自转时, 转到图 1 所示位置时, 带正电的半圆的电流方向向上, 在半圆右侧产生的磁场方向为垂直纸面向外, 在半圆左侧产生的方向为垂直纸面向里. 同理可得, 此时, 带负电的半圆的转动方向向下, 电流方向依然向上, 在半圆右侧产生的磁场方向为垂直纸面向外, 在半圆左侧产生的方向为垂直纸面向里. 因此, 在带电驻极体自转时, 其带不同电荷的两部分所产生的磁场是相互叠加增强的, 能够产生更强的磁场信号, 有利于无线通信的传输.

选用低频磁场信号来进行通信而不是电场信号的原因是强导电介质中的电磁波将大部分能量存储在磁场中, 而且此频率范围内对于磁场信号的背景

干扰水平较低<sup>[19]</sup>, 因此能够捕捉到微小的磁场信号, 精确度高, 而若采用电场信号通信, 势必会在传播过程中受到外界环境的干扰和衰减, 影响低频无线通信的质量.

## 2.2 磁场计算

根据毕奥-萨伐尔定律知, 带电量为  $q$  的点电荷产生的磁场  $B$  与距离  $l$  的关系式:

$$B = \frac{\mu_0 q}{4\pi l^2} \mathbf{v} \times \hat{l} \quad (1)$$

其中,  $\mu_0 \equiv \frac{1}{c^2 \epsilon_0} = 4\pi \times 10^{-7} (\text{N} \cdot \text{A}^{-2})$  为真空磁导率,  $\mathbf{v}$  为点电荷速度矢量,  $\hat{l} = l/l$  为沿  $l$  方向的单位矢量.

采用积分法对整个圆盘进行积分, 如图 2 所示, 取  $A$  点的面积微元  $dS(r, \theta)$  在接收点所产生的磁场大小  $dB$  为:

$$dB = \frac{\mu_0 \rho \cdot dS \cdot v_{\perp}}{4\pi l^2} = \frac{\mu_0 \rho \cdot (r d\theta dr) \cdot \omega r \cos\theta}{4\pi l^2} = \frac{\mu_0 \rho \omega}{4\pi l^2} r^2 \cos\theta dr d\theta \quad (2)$$

其中  $\rho$  为驻极体表面电荷密度,  $v_{\perp}$  是垂直于  $\hat{l}$  的线速度分量,  $\omega$  是圆盘的旋转角速度.

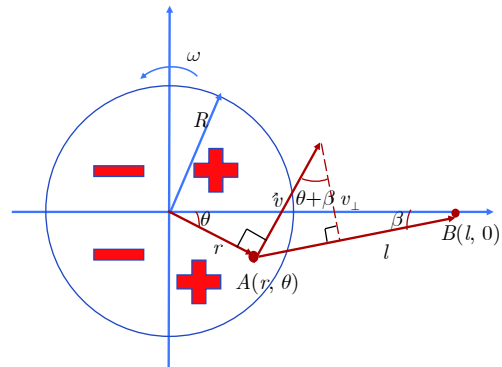


图 2 磁场计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic field calculation

整个圆盘旋转所产生的磁场大小  $B$  为:

$$B \approx 2 \iint dB = 2 \cdot \frac{\mu_0 \rho \omega}{4\pi l^2} \cdot \int_0^R r^2 dr \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta d\theta = \frac{\mu_0 \rho \omega R^3}{3\pi l^2} \quad (3)$$

其中  $R$  为带电驻极体的圆盘半径. 以上可以看出, 所产生磁场的大小与转动角速度和圆盘半径的三次方成正比, 同时以传播距离平方的倒数衰减; 而如果磁场强度固定不变, 传播距离与  $R^{\frac{3}{2}}$  和  $\omega^{\frac{1}{2}}$  成正比. 这就意味着, 在实际应用中, 如果磁场接收器的灵敏度不够高时, 可以通过增大驻极体圆盘的半径和



旋转角速度来产生更大的磁场。

### 2.3 传播衰减

电磁波的磁场分量大小  $B$  在介质中的传播衰减公式为:

$$B = B_0 e^{-\alpha l} \sin(\omega t - \beta l + \varphi) \quad (4)$$

其中  $B_0$  为场源处磁场分量,  $\alpha$  为衰减系数,  $\beta$  为相位系数,  $l$  为传播距离,  $\omega$  为电磁波频率,  $\varphi$  为初始相位角。

良导体中如海水,  $\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}{2}} = \beta$ ,  $\mu_r$  为相对磁导率,  $\sigma$  为电导率

不良导体如空气,  $\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon}}$  与频率无关,  $\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon}$ ,  $\varepsilon$  为实介电常数

联立 (3)、(4) 得, 机械天线在距离  $l$  处产生的磁场大小  $B$  公式为:

$$B = \frac{\mu_0 \rho \omega R^3}{3\pi l^2} e^{-\alpha l} \sin(\omega t - \beta l + \varphi) \quad (5)$$

根据式 (5), 取驻极体表面电荷密度为  $\rho = 3400 \text{ nC/cm}^2$  (数据来自于美国 DARPA 局机械天线项目), 驻极体圆盘半径为  $0.5 \text{ m}$ , 海水的相对磁导率  $\mu_r = 1$ , 电导率  $\sigma = 4 \text{ S/m}$ , 在 MATLAB 软件中建立理论解析模型, 改变圆盘旋转角速度, 即改变所产生的电磁波频率得图 3。

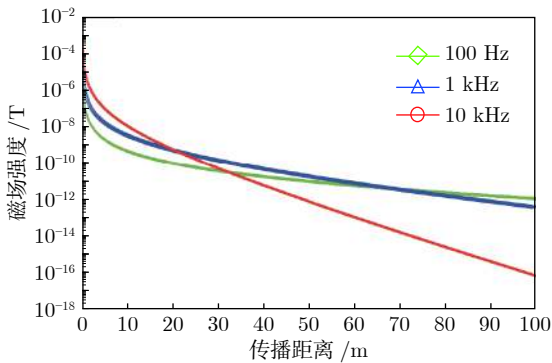


图 3 海水中不同频率电磁波传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electromagnetic wave propagation at different frequencies in seawater

从图 3 中可以看出, 较高频率的电磁波在近场源处产生的场强较大, 但是由于海水是良导体, 衰减系数与电磁波频率有关, 频率越高衰减越多, 因此在传播过程中场强渐渐小于较低的频率电磁波, 下降趋势越来越快. 以  $100 \text{ Hz}$  的电磁波为例, 虽然近处产生的场强较小, 但是传播距离较远, 在  $100 \text{ m}$  处才衰减到约为  $10^{-11} \text{ T}$ , 此时采用磁场传感

器接收磁场信号能够满足通信需要。

### 2.4 功率计算

本文所提出的旋转驻极体式机械天线在正常工作时需要消耗的功率也是在机械天线设计时需要考虑的重要因素之一, 消耗功率计算如下:

$$P_{M-ant} = P_f + P_r + P_{EM} \quad (6)$$

其中,  $P_{M-ant}$  为机械天线所消耗的总功率,  $P_f$  为旋转时克服介质中摩擦阻力所做的功率,  $P_r$  为加速机械天线到指定转速时所消耗的转动功率,  $P_{EM}$  为机械天线发射出的电磁波所携带能量的功率。

三种功率的具体计算公式如下:

$$P_f = \tau_f \omega \quad (7)$$

$$P_r = J \frac{d\omega}{dt} \omega \quad (8)$$

$$P_{EM} = E_0 H_0 S_0 \quad (9)$$

其中,  $\omega$  为机械天线转动角速度,  $\tau_f$  为机械天线转动时摩擦阻力矩,  $J$  为机械天线转动惯量,  $t$  为加速到  $\omega$  转速时所需要的时间,  $E_0$ 、 $H_0$ 、 $S_0$  分别为机械天线外壳处的电场强度、磁场强度和球面面积. 由于在机械天线稳定旋转时  $P_r = 0$ , 因此本文重点研究第一种和第三种功率, 即克服介质中摩擦阻力所做的功率  $P_f$  和机械天线发射出的电磁波所携带能量的功率  $P_{EM}$ .

以圆筒结构机械天线在空气中旋转为例, 在圆筒的侧面和底面上取微元, 然后通过积分得到:

$$\tau_f = c_f \rho_{air} \pi \omega^2 R^4 H \quad (10)$$

其中,  $c_f$  为摩擦阻力系数,  $\rho_{air}$  为空气密度,  $R$  为圆筒半径,  $H$  为圆筒高度。

根据 Prandtl-Schlichting 公式得到  $c_f$  的计算公式:

$$c_f = \frac{0.455}{[\lg(Re)]^{2.58}} \quad (11)$$

其中,  $Re = \frac{\rho r v}{\mu}$  为雷诺数,  $\rho$  为流体密度,  $r$  为微元距轴心的距离,  $v$  为微元旋转线速度,  $\mu$  为流体动力粘度, 空气的流体动力粘度为  $17.9 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 空气密度为  $1.29 \text{ kg/m}^3$ 。

而 Schlichting 在《边界层理论》中提到, 对于旋转体, 可采用统一的雷诺数, 则简化为:

$$Re = \frac{\rho R v}{\mu} = \frac{\rho R^2 \omega}{\mu} \quad (12)$$

将式 (10)~(12) 代入式 (7) 中可得, 圆筒型机械天线在正常工作时克服空气摩擦阻力所消耗的功率为:

$$P_f = \frac{0.455}{\left[ \lg \left( \frac{\rho_{air} R^2 \omega}{\mu} \right) \right]^{2.58}} \rho_{air} \pi \omega^3 R^4 H \quad (13)$$

为了研究各参数对于机械天线在正常工作时克服摩擦阻力所消耗功率的影响, 改变参数的不同取值, 根据式 (13) 作出如下曲线图, 如图 4 所示。

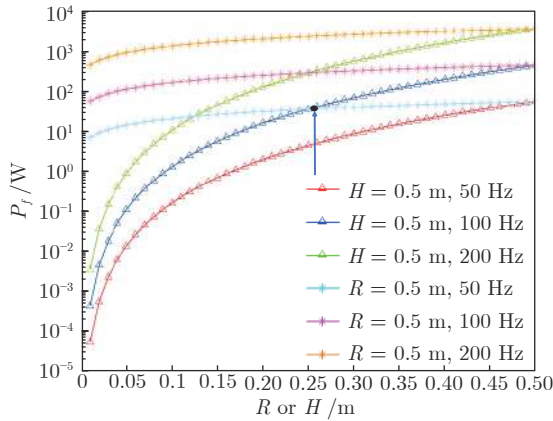


图 4 各参数对克服摩擦阻力所消耗功率的影响

Fig. 4 The influence of various parameters on the power consumption to overcome friction resistance

如图 4 所示, 其中横坐标指的是在机械天线圆筒外壳的半径  $R$  或者高度  $H$  之一不变的情况下, 另一参数在特定转动角速度下的变化对功率消耗的影响。可以看出, 机械天线在正常工作时克服摩擦阻力所消耗功率近似与圆筒高度、转速 3 次方和半径 4 次方成正比, 且在同一频率下, 高度的变化对功率影响比半径小。在图 4 中黑色交点处, 两条曲线的参数分别是  $H = 0.5$  m, 转速 100 Hz,  $R = 0.25$  m 与  $R = 0.5$  m, 转速 50 Hz,  $H = 0.25$  m, 而二者相交即此时功率相等, 可以说明细高形的圆筒能在较大的转速频率下有较小的摩擦阻力功率消耗。

针对第三种功率  $P_{EM}$ , 即机械天线发射出的电磁波所携带能量的功率的分析如下:

对于平面电磁波, 电场方向和磁场方向相互垂直, 且  $\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$ , 即  $E = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}H = \sqrt{\frac{1}{\epsilon\mu}}B = cB$ , 且  $S_0 = 4\pi R^2$ , 代入式 (9) 中得:

$$P_{EM} = E_0 H_0 S_0 = \frac{1}{\mu} 4\pi c B_0^2 R^2 \quad (14)$$

其中, 其中  $B_0$  为机械天线外壳处磁感应强度,  $c$  为光速,  $\mu$  为介质磁导率。

由式 (14) 可得, 高度和半径对机械天线发射出的电磁波所携带能量功率的影响相同, 都为 2 次方。

经过计算发现, 第一种功率  $P_f$  比第三种功率  $P_{EM}$  大将近 4 个数量级, 在同一几何尺寸下发射

100 Hz 电磁波, 机械天线克服摩擦阻力功率为 15.47 W, 而其所发射出的电磁波所携带能量的功率仅为 0.0012 W。

### 3 机械天线有限元模型

为了进一步验证本文所述的基于驻极体材料机械天线式低频通信方法的理论正确性, 本文在理论分析的基础上, 采用有限元模型<sup>[20]</sup> 仿真结果与理论解析模型的结果相对比的方法, 利用有限元建模仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立基于旋转驻极体的机械天线模型。

#### 3.1 机械天线有限元模型的建立与结果分析

在 COMSOL 软件中通过选用三维磁场模块, 将所用的元件按照几何尺寸添加到工作区, 同时选择相应的材料特性, 施加约束条件以及划分网格等操作, 建立了基于旋转驻极体的机械天线有限元模型, 其模型网格剖分图如图 5 所示。

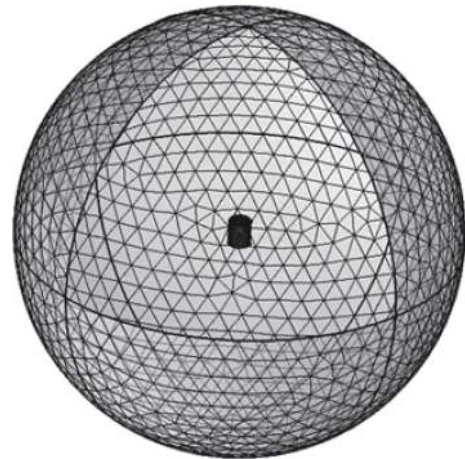


图 5 机械天线三维模型网格剖分图

Fig. 5 Mesh generation of three-dimensional model of mechanical antenna

图 5 的中心即为机械天线, 为了定量分析, 在理论解析模型<sup>[21]</sup> 和有限元模型中选用相同的参数, 机械天线外壳高度为 50 cm, 半径为 20 cm, 在传播介质为空气中研究 1 kHz 电磁波与传播距离的关系, 得到两种模型的结果对比图, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 两种模型的结果图曲线趋势相同, 数值近似, 能够验证解析模型与有限元模型的正确性。二者存在的误差主要是由于理论解析模型里只考虑了电生磁的初步电磁转换, 而忽略了后续磁生电的二次效应等, 这在之后的研究中将做进一步的改进。

在验证有限元模型的正确性后, 基于该模型改

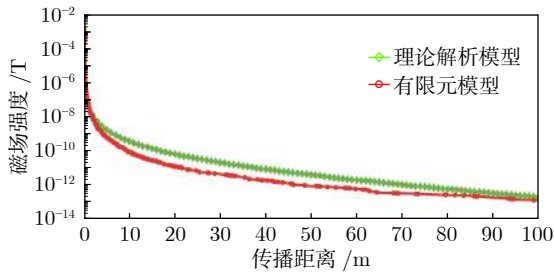


图 6 有限元模型与理论解析模型的结果对比图

Fig.6 Comparisons of results between finite element model and theoretical analytical model

变不同传播介质,以产生 1 kHz 磁场信号为例,得到如下传播效果图,如图 7 所示。

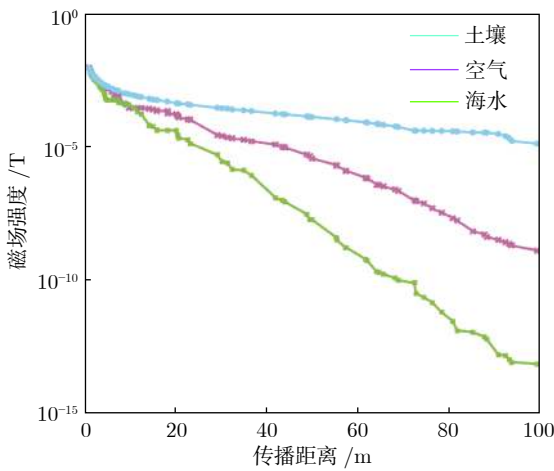


图 7 机械天线不同介质传播效果图

Fig.7 The propagation of different media of mechanical antenna

从图 7 可以看出,在不同的介质中,机械天线产生相同条件下的电磁波的传播效果不同,在土壤中传播效果最好,衰减最慢,传播距离较远,而海水由于是良导体,对于电磁波的吸收较其他两种介质较多,因此传播效果较差,这点与理论解析结果一致.同时可以看出本文所研究的基于驻极体材料低频通信机械天线在土壤中也能够传播较远的距离,如果采用高精度高灵敏度微弱磁场传感器接收磁场信号,便可实现陆地远距离通信和透地通信。

### 3.2 两种机械天线比较

由于目前国内外对于机械天线式低频通信方法研究较多集中在旋转永磁体式,旋转永磁体产生低频电磁波的原理与驻极体类似,都是通过机械装置驱动电磁场变化从而激发出低频电磁波,本文选取一种具有代表性的旋转永磁体式机械天线与旋转驻

极体式相比较,分析两者的优缺点。

根据文献 [22] 中旋转永磁体式机械天线的仿真结果,在本文的机械天线有限元模型中选用同样的参数进行比较,即尺寸  $20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ,剩磁为  $1.2 \text{ T}$ ,在距离天线  $1 \text{ m}$  处产生的磁感应强度大小为  $7 \times 10^{-11} \text{ T}$ ,图 8 为仿真结果比较图。

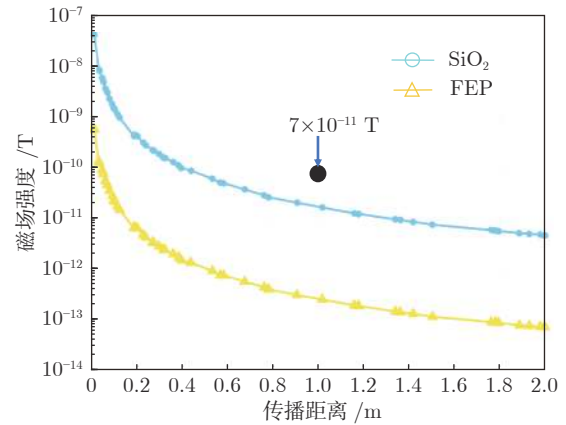


图 8 两种机械天线仿真结果比较图

Fig.8 Comparison of simulation results of two kinds of mechanical antennas

图 8 中选用两种不同的驻极体材料 FEP 和  $\text{SiO}_2$ ,仿真其单层结构产生的磁感应强度随传播距离的变化.从图中可以看出,即使采用目前表面电荷密度最大的  $\text{SiO}_2$  驻极体,其单层结构产生的磁感应强度幅值也不及旋转永磁体,但在同一数量级.虽然旋转永磁体式机械天线产生的磁感应强度信号的幅值比旋转驻极体式机械天线大,但旋转驻极体比永磁体有如下优势:

1) 旋转驻极体式机械天线可以通过多层驻极体结构和改变电机转速来改变产生磁感应强度信号的幅值,即可用调幅的方式来调制通信信号,而旋转永磁体式机械天线由于剩磁和尺寸已固定,且场强幅值与转速无关,想改变产生磁场的幅值较为困难.

2) 旋转驻极体式机械天线可以通过多瓣结构来提高产生磁感应强度信号的频率,作为通信载波时可以拓宽信号带宽,提高通信质量.

3) 旋转驻极体式机械天线中,驻极体和支撑材料均可选用柔性材料,制成的天线具有可折叠易于携带等优点.

## 4 机械天线测试平台与实测结果分析

根据上文所设计的基于旋转驻极体式机械天线低频通信方法的理论和仿真结果,机械天线样机测试平台整体思路如图 9 所示.

如图 9 所示,整个机械天线样机测试平台由控



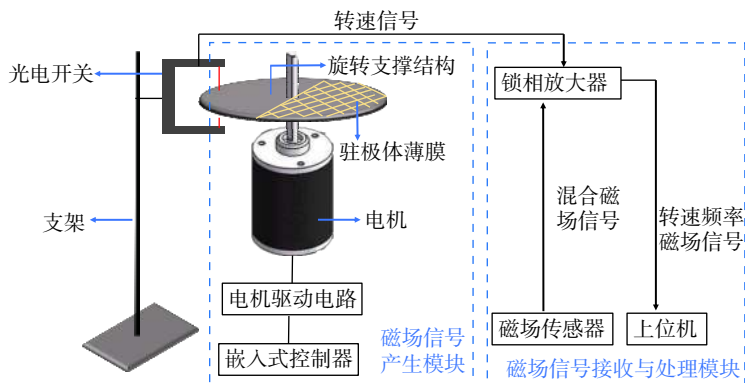


图9 样机测试平台整体思路图

Fig.9 Overall idea of prototype test platform

制器、电机驱动电路、电机、旋转支撑结构、驻极体材料、光电传感模块、锁相放大器以及磁通门计组成。其中，嵌入式控制器控制电机驱动电路，使电机带动所述旋转支撑结构一同旋转；驻极体材料在经过电晕极化后，带不同种类电荷，粘附在旋转材料上；磁通门计是具有较高测量灵敏的磁场传感器，能够测量较小的磁场信号，用来接收包含地磁和电机磁部分干扰的磁场混合信号；光电传感模块能够通过光电反射测量驻极体旋转速度，并将其转速信号送入锁相放大器；锁相放大器能够以光电转速信号为参考频率，在磁场混合信号中提取特定频率的磁场信号并通过滤波放大等信号处理方法解调通信信号，实现低频通信功能。

基于上述思路，研制机械天线样机及测试平台，得到测试结果与有限元模型仿真结果比较如图10所示。

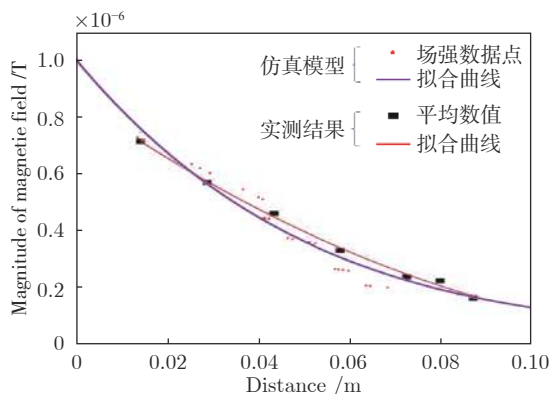


图10 实测数据与仿真结果比较图

Fig.10 Comparison diagram of measured data and simulation results

如图10所示，可以看到，仿真计算结果与实测结果曲线趋势相同，数值近似，结果较为一致，从实际应用层面验证了本文所述基于驻极体机械天线式

低频通信方法的有效性和可行性。

## 5 结论与展望

水下航行器是海洋信息网络体系的重要组成部分，但目前与其进行低频通信存在技术挑战。针对低频通信领域中发射系统结构复杂、体积庞大的问题，本文提出了一种基于复合聚合物驻极体纳米材料的机械天线式低频通信方法。与传统天线相比，机械天线体积小、重量轻，具有抗破坏性强、移动性强、隐蔽性好等优点。本文对所述方法进行了理论推导，建立了机械天线电磁传播的解析模型，定量分析了机械天线所产生的低频磁场信号，推导出其数学计算公式，并讨论了其功率消耗，又利用多物理场有限元仿真软件建立了有限元模型，并通过理论解析模型和多物理场有限元模型的双重仿真结果的一致性，以及仿真计算结果与机械天线样机的实测结果的对比，验证了所提方法的可行性。

但本方法仍存在些许不足和局限，在机械天线产生和发射磁场信号的理论计算过程中只考虑了电生磁的初步电磁转换，而忽略了之后磁生电的二次效应等；在有限元模型分析的后续研究中可根据实际情况增加驱动电机和支撑机构的材料和剩磁等参数对驻极体式机械天线所产生磁场的影响，从而根据仿真分析结果进一步优化样机的设计；同时在后续的研究中可把调制解调因素即在机械天线所产生发射的磁场信号上加载通信信号时的具体情况纳入理论计算和仿真模型的分析中，进一步完善本文所研究的基于驻极体机械天线式低频通信方法。

## References

- 1 Yan Jing, Zhang Li, Luo Xiao-Yuan, Pu Bin, Guan Xin-Ping. Cooperative positioning algorithm of underwater vehicle based on information physical fusion under asynchronous clock. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(4): 739-748  
(闫敬, 张立, 罗小元, 濮彬, 关新平. 异步时钟下基于信息物理融

- 合的水下潜器协同定位算法. *自动化学报*, 2019, **45**(4): 739–748)
- 2 Zhao Tao, Liu Ming-Yong, Zhou Liang-Rong. Research status and challenges of autonomous underwater vehicles. *Fire Control and Command Control*, 2010, **35**(6): 1–6  
(赵涛, 刘明雍, 周良荣. 自主水下航行器的研究现状与挑战. *火力与指挥控制*, 2010, **35**(6): 1–6)
  - 3 Tao Wen, Chen Ding-Ding, He Ning-Ning. Development of communication technology and equipment for naval submarines abroad. *Communication Technology*, 2015, **48**(4): 375–381  
(陶雯, 陈鼎鼎, 何宁宁. 国外海军潜艇通信技术与装备发展. *通信技术*, 2015, **48**(4): 375–381)
  - 4 Lu Jian-Xun. Discussions on some problems of anti-jamming high frequency communication system. *Modern Military Communication*, 2002, **10**(1): 28–30  
(陆建勋. 抗干扰高频通信系统若干问题的探讨. *现代军事通信*, 2002, **10**(1): 28–30)
  - 5 Feng L Y, Leung K W. Dual-frequency folded-parallel-plate antenna with large frequency ratio. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, **64**(1): 340–345
  - 6 Kemp M A, Franzi M, Haase A, et al. A high Q piezoelectric resonator as a portable VLF transmitter. *Nature communications*, 2019, **10**(1): 1715
  - 7 Ding Chun-Quan, Song Hai-Yang. Research on the motion charge and magnetic dipole radiation of mechanical antenna. *Ship Electronics Engineering*, 2019, **39**(2): 171–175  
(丁春全, 宋海洋. 机械天线运动电荷和磁偶极子辐射研究. *舰船电子工程*, 2019, **39**(2): 171–175)
  - 8 Prasad M N S, Huang Y, Wang Y E. Going beyond Chu har-rington limit: ULF radiation with a spinning magnet array. In: Proceedings of XXXIIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). Montreal, Canada: IEEE, 2017. 1–3
  - 9 Prasad M N S, Selvin S, Tok R U, et al. Directly modulated spinning magnet arrays for ULF communications. In: Proceedings of the 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Anaheim, USA: IEEE, 2018. 171–173
  - 10 Bickford J A. Mechanical Antenna, U. S. Patent 10177452, January 2019
  - 11 Beihang University. A Low Frequency Communication System for Rotating Electret Mechanical Antenna, China Patent CN109004948A, December 2018
  - 12 Wuhan Institute of Ship Communication. A Low Frequency Antenna, China Patent CN108346851A, July 2018
  - 13 Xi'an University of Electronic Science and Technology. Miniaturized LF/VLF transmitting antenna based on acoustic standing wave resonant structure, China Patent CN108736157A, November 2018
  - 14 Chu Y, Zhong J, Liu H, et al. Human pulse diagnosis for medical assessments using a wearable piezoelectret sensing system. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(40): 1803413
  - 15 Erhard D P, Lovera D, von Salis-Soglio C, et al. Recent advances in the improvement of polymer electret films. *Complex Macromolecular Systems II*. Berlin Germany: Springer, 2010. 155–207
  - 16 Pasku V, De Angelis A, Dionigi M, et al. A positioning system based on low-frequency magnetic fields. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **63**(4): 2457–2468
  - 17 Reis S, Castro N, Silva M P, et al. Fabrication and characterization of high-performance polymer-based magnetoelectric DC magnetic field sensors devices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(6): 4928–4934
  - 18 Gautam P R, Kumar S, Verma A, et al. Energy-efficient localization of sensor nodes in wsns using beacons from rotating directional antenna. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(11): 5827–5836
  - 19 Madanayake A, Choi S, Tarek M, et al. Energy-efficient ULF/VLF transmitters based on mechanically-rotating dipoles. In: Proceedings of the 2017 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCCon). Sri Lanka: IEEE, 2017. 230–235
  - 20 Wang Mo-Nan. Fracture healing simulation based on blood supply conditions and mechanical environment. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(2): 240–250  
(王沫楠. 基于血液供给条件和力学环境的骨折愈合仿真. *自动化学报*, 2018, **44**(2): 240–250)
  - 21 Liang B, Cui Y, Song X, Li L, Wang C. Multi-block electret-based mechanical antenna model for low frequency communication. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 2019, **10**(5): 1950036
  - 22 Zhang Duo-Jia. Research on Mechanism and Modulation Method of Ultra-low Frequency Mechanical Antenna [Master thesis], Xi'an University of Technology, China, 2019.  
(张多佳. 超低频率机械天线机理及调制方法研究. 西安理工大学, 中国, 2019.)



**崔 勇** 北京航空航天大学自动化与电气工程学院副教授. 主要研究方向为电磁场和微纳传感.

E-mail: cuiyong@buaa.edu.cn

(**CUI Yong** Associate professor at the School of Automation and Electrical Engineering, Beihang University. His research interest covers electromagnetic field and micro nano sensor.)



**王 琛** 北京航空航天大学自动化与电气工程学院硕士研究生. 主要研究方向电磁场测量和仿真建模.

E-mail: sy1703208@buaa.edu.cn

(**WANG Chen** Master student at the School of Automation and Electrical Engineering, Beihang University. His research interest covers electromagnetic field and model simulation.)



**宋 晓** 北京航空航天大学自动化学学院副教授. 主要研究方向为深度学习, 知识图谱, 建模与仿真技术. 本文通信作者.

E-mail: songxiao@buaa.edu.cn

(**SONG Xiao** Associate professor at the School of Automation and Electrical Engineering, Beihang University. His research interest covers deep learning, knowledge graph, modeling and simulation. Corresponding author of this paper.)