

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208834

新型井下磁偶极子蛇形天线仿真设计*

孙成芹 胡永建 张国田 孙琦 张冠杰 唐昱哲

(北京石油机械有限公司技术中心 北京 102206)

摘要: 针对石油钻井井下天线工作在井筒钻井液及地层组成的特殊环境中,无线传输信号损耗大、难以可靠传输的问题,通过仿真建模,设计一种新型磁偶极子天线,具备高增益、抗干扰和小型化特点,实现井下无线数据的可靠传输。首先采用 HFSS 三维仿真软件构建仿真模型,详细将天线的长度、距离钻柱本体位置及天线的蛇形弯折数等关键参数进行计算,得出有效传输的参数组合和频点规律。据此规律,设计了天线实物,仿真结果与实物测试结果相对,具有高度一致性,回波损耗可达到 -7.5 dB 以下,仿真设计的参数可以满足实际应用需求。该天线设计可应用于石油钻井井下无线传输,可提高信号发射强度,减小天线尺寸,降低系统功耗,实现无线信号可靠传输。

关键词: 随钻测量;蛇形天线;天线仿真

中图分类号: TN98;TE927 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Simulation design of a new downhole magnetic dipole snake antenna

Sun Chengqin Hu Yongjian Zhang Guotian Sun Qi Zhang Guanjie Tang Yuzhe

(Beijing Petroleum Machinery Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the problem that the oil drilling downhole antenna works in a special environment composed of wellbore drilling fluid and strata, the wireless transmission signal loss is large and it is difficult to transmit reliably. Through simulation modeling, a new type of magnetic dipole antenna is designed. The features of interference and miniaturization enable reliable transmission of underground wireless data. Firstly, the HFSS three-dimensional simulation software is used to build a simulation model, and the key parameters such as the length of the antenna, the distance from the drill string body and the number of serpentine bends of the antenna are calculated in detail, and the parameter combination and frequency point law of effective transmission are obtained. According to this rule, the actual antenna is designed, and the simulation results are highly consistent with the actual test results. The return loss can reach below -7.5 dB, and the parameters of the simulation design can meet the actual application requirements. The antenna design can be applied to underground wireless transmission in oil drilling, which can improve signal transmission strength, reduce antenna size, reduce system power consumption, and achieve reliable wireless signal transmission.

Keywords: measurement while drilling; snake antenna; antenna simulation

0 引言

当前,石油井下随钻测量仪器发展方向主要朝着更低成本、更高效率、更多功能方向发展,如更接近钻头位置的旋转导向与测量,导向与测斜一体化,钻头处实时压力、振动多参数测量等新工具层出不穷。但电磁波信号在井下特殊工况中实现高速无线传输仍然是个难题。如井下钻头处信号如何越过常规螺杆钻具上传、特殊钻井工具短距离数据传输等。井下常规螺杆钻具的内部结构布线十分困难,尤其是复杂的动静连接结构,如万向轴和传动轴之间需要

做相对旋转运动,无法直接铺设同轴电缆^[1]。另外,在使用油基钻井液钻井情况下,钻井液的电导率很低接近于空气,对天线设计提出了更高的要求。

国内外针对无线传输天线设计的研究有很多,多数是针对高频地面天线的,如磁偶极子天线,具有传输增益稳定^[2-3]、抗干扰和小型化的特点,还可以有多种馈电方式^[4],但常规应用为高频毫米波天线^[5-6],常见文献中广泛应用的毫米波天线有:微带贴片天线、腔体天线、缝隙天线^[7]等,此类天线需要使用地面空间波进行传输,在大气传输中存在

收稿日期:2022-01-12

* 基金项目:中石油集团基金(2021DQ03-03)项目资助

严重衰减^[8],不能直接应用于井下电绝缘性能高的环境,井下应用的磁耦极子天线研究尚属空白。因此,本文主要针对钻井井下短距离无线传输天线需求,开展建模及三维软件仿真计算,设计一种新型磁耦极子天线,充分利用磁耦极子天线小型化、抗干扰的优点,通过钻井工作环境中的三维建模仿真,分析天线设计特征参数对传输特性的影响,寻找最优参数组合,实现天线实物设计达到实际应用需求。

1 井下无线测量整体设计

1.1 应用背景

在石油钻井过程中,井下测量仪器常用于近钻头附近、螺杆钻具上方两个位置,但由于钻头处振动大、空间更为狭小,所安放的传感器数量受限。因此,需要将主要信号采集装置放置于螺杆钻具上方,而两者之间的通信布线困难,无线传输设计结构如图 1 所示。

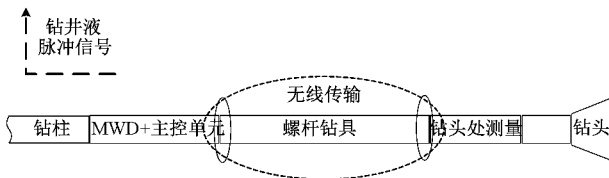


图 1 系统整体结构

在通信领域中,无线传输使用的频段只是电磁波频段中很小的一部分,单位为 Hz。按照电气和电子工程师学会(IEEE)制定的频谱划分表,低频频率为 30~300 kHz,中频频率为 300~3 000 kHz,高频频率为 3~30 MHz,频率范围在 30~300 MHz 的为甚高频,对应电磁波的波长为米波 10~1 m,频率越高波长越小。甚高频段以上的如毫米波等传输信号由于衰减大,并不适用于井下实时工况,因此,选择合适的频段非常重要,根据井下工况条件,选用工程上常用的磁偶极子天线作为基础,频率选用中低频段,使用蛇形走线结构实现设计。天线的长度往往是波长的 1/4 或 5/8,而井下空间有限,天线长度和信号衰减需要综合考虑,波长越短衰减越大,选择合适的尺寸成为设计难点。

1.2 偶极子天线数学模型

偶极子天线可分为电偶极子天线和磁偶极子天线两种,电偶极子是指直线型天线,任何直天线都可认为是由大量很短的导体串接而成,这种双臂形状完全对称的短直导体称为电偶极子。磁偶极子天线指的是半径相对小的磁流环路,是环状磁天线的基本结构。而磁耦极子天线由于辐射功率较大,结构更适合用于井下钻柱的圆柱形安装,偶极子电场分析如图 2 所示,磁耦极子结构分析如图 3 所示,详细计算分析如下:

设在 Z 轴上有长度为 L 的偶极子,其中心与原点重合,如图 2 所示。设包围偶极子的媒质是空气或真空,可求得任意点处电场分量 E_r , E_θ 和 E_ϕ 的表达式。

磁耦极子是半径相对小的磁流环路,是环状磁天线的

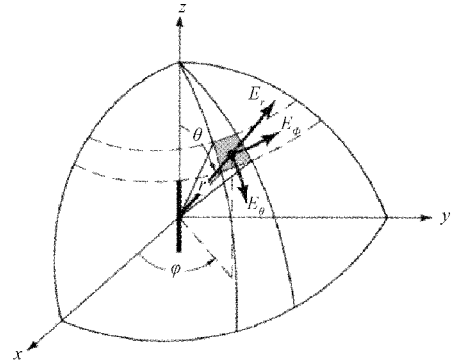


图 2 偶极子电场分析^[9]

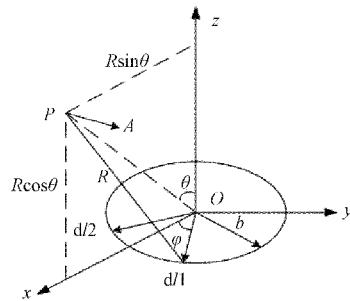


图 3 磁耦极子结构分析^[9]

基本结构。以半径为 b 的导线环为例,分析计算图中磁偶极子在 P 点的矢量磁位和磁通量密度。磁偶极子的圆心位于笛卡尔坐标系的原点。按照偶极子电场计算方法,电场计算表达式如下:

$$E_r = E_\theta = H_\phi = 0$$

$$E_\phi = \eta \frac{(kb)^2 I_0 \sin\theta}{4r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{jkr}$$

其中, η 为本征阻抗, k 为天线辐射的波数。磁偶极子天线的辐射功率为:

$$P_{rad} = \eta \left(\frac{\pi}{12} \right) (kb)^4 |I_0|^2 = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_r$$

进而计算可得磁偶极子的辐射阻抗为:

$$R_r = \eta \left(\frac{\pi}{6} \right) (k^2 b^2)^2 = \eta \frac{2\pi}{3} \left(\frac{kS}{\lambda} \right)^2 = 20\pi^2 \left(\frac{C}{\lambda} \right)^4$$

根据天线的辐射功率 P_{rad} , 可以求得天线的辐射阻抗 R_r , $S = \pi b^2$ 代表磁偶极子的环面积, $C = 2\pi b$ 代表环周长。由此可见,增加磁耦极子天线半径及减小波长,可以提高辐射功率。

1.3 蛇形偶极子天线特点及应用

常规蛇形天线是广泛应用的一种天线结构,主要用在蓝牙、WiFi、ZigBee 等超高频领域,中高频信号中的应用并不多见。蛇形天线的弯折是随性的,弯折采用曲流技术,需要根据每个项目的具体应用来决定。由于弯曲的形状使得在同样空间可布局更长的天线,因此可实现天线的小型化^[10]。PCB 设计中采用蛇行线有助于提高主板、显卡的稳定性,有助于消除长直线在电流通过时产生的电感

现象,减轻线与线之间的串扰问题,在高频率时表现得尤为明显。

图 4 中,箭头表示天线表面电流的方向,可以看出,蛇形天线相邻的两垂直段的电流方向相反。假设天线是理想导体,当垂直段无限靠近时,则垂直段上的电流将被抵消归 0,那么整个天线上的电流强度将会严重削弱。当电流变弱后,相应的电磁波也会变弱,而天线的原理则是将功率信号转化为电磁波,因此,可以认为天线的表面电流直接决定了天线增益的大小。

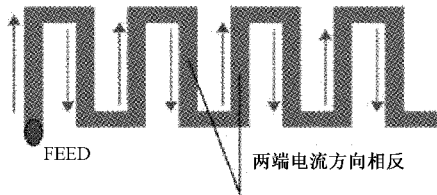


图 4 常规蛇形天线结构

因此,当偶极子天线采用蛇形结构将有利于加大天线的长度,降低损耗,减轻线间串扰,有利于提高石油井下无线传输中高频信号的稳定性。

石油随钻仪器无线测量由于工作于井下岩石环境,过高频率电磁波易被吸收消耗掉,因此,选中高频段较为合适。但在低频段使用蛇形天线的情况并不多见,属于探索性尝试,但由于蛇形天线可以实现小型化的特性,有利于提高信号稳定性。

2 天线参数仿真

2.1 仿真工具简介

ANSYS HFSS 是一款 3D 电磁 (EM) 仿真软件,用于设计和仿真高频电子产品,如天线,天线阵列,射频或微波元件,高速互连,滤波器,连接器,IC 封装和印刷电路板,官网有学生版可以免费试用。有限元算法是 ANSYS HFSS 的核心算法,已有 20 多年的商用历史,也是目前业界最成熟稳定的三维电磁场求解器,有限元算法的优点是具有极好的结构适应性和材料适应性,充分考虑材料特性:趋肤效应、介质损耗、频变材料;是精确求解复杂材料复杂结构问题的最佳利器,有限元算法采用四面体网格,对仿真物体能够很好的进行还原,具有仿真速度快,可靠性高等优点^[11-12]。

HFSS 有限元算法在网格划分方面^[13]能够支持自适应网格剖分、网格加密、曲线型网格,在求解时支持切向矢量基函数、混合阶基函数和直接法、迭代法、区域分解法的强大的矩阵求解技术。该算法可以进行大尺寸物体的计算,大幅度提升仿真工程师的工作效率,解决了电磁场理论抽象、公式推导繁琐等问题,针对宽带问题,FEM 推出了宽带自适应网格剖分,大大提升了仿真精度。

2.2 蛇形天线绘制

HFSS 仿真软件中有立方体、圆柱体等三维模型,可以

绘制仿真三维天线结构,难点在于蛇形天线需要安装于圆柱形钻柱本体上,绘制需要计算单根水平天线的放置角度,弯折数越多,复杂度增加。也可使用其他软件如 CAD、Solidworks 等绘制三维模型^[14],再转换为兼容格式导入 HFSS,但由于软件之间兼容性问题,不能在仿真过程中调节参数及自动参数扫频,不利于仿真网格剖分计算。因此,仍采用 HFSS 仿真软件绘制,主要仿真参数:天线材质为 brass,环境介质为真空,线径为 1 mm,钻柱直径为 200 mm,钻柱材质为 iron。端口采用集总端口激励方式,天线模型如图 5、6 所示。

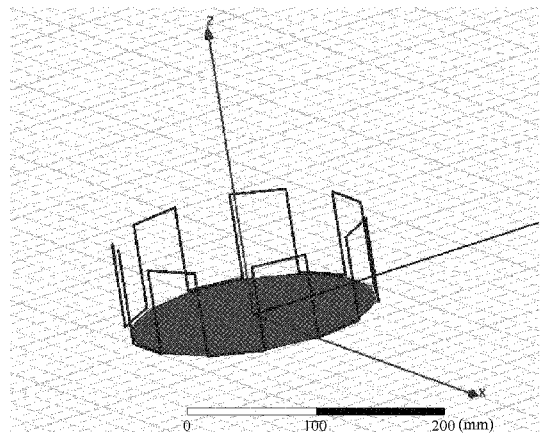


图 5 蛇形天线基本单元

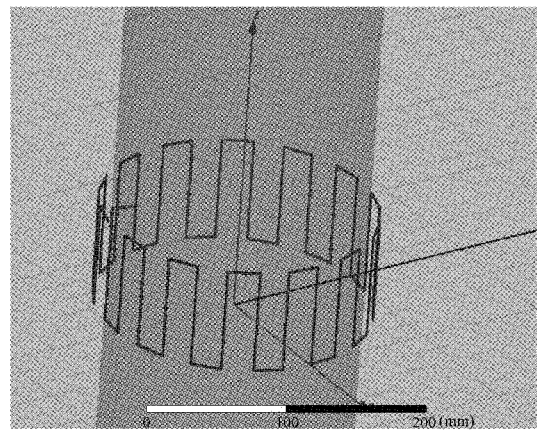


图 6 天线及钻柱仿真模型

2.3 天线特征参数设计

根据实际应用及资料调研,磁耦极子天线臂长是对频点影响较大主要因素^[15]。因此,针对蛇形天线的弯折数、单边天线高度、与钻柱本体之间距离 3 个重要参数进行仿真。

1) 固定天线弯折数

为测试蛇形磁耦极子天线长度的影响,先固定天线的弯折数,比较不同矩形单边长度衰减效果,设计对比值为 7、14、28 cm 3 种情况下,每一种根据天线与钻柱不同间距设计一组仿真计算,间距最小为 10 mm,最大为 95 mm,设

计好辐射边界条件、扫频设置之后^[16],即可得出计算结果 S_{11} 参数,数据分析如下。

从图 7~9 中可看出,随间距的减小,回波损耗逐渐减小,具有明显的线性关系。但随着单边长度的增加,越长越好, S_{11} 参数出现波动,长度最大的 28 cm 的 S_{11} 参数与最低的保持一致,说明最优参数应当位于中间长度。综合上述 3 组图数据看,随着天线长度的增加,同样间距的情况下,天线衰减变小,频率点逐渐降低。

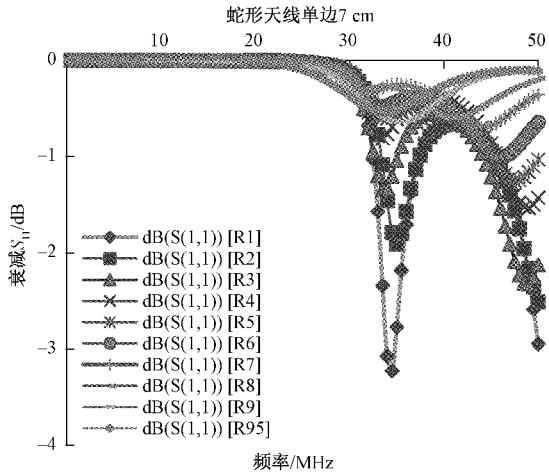


图 7 固定弯折单边长度 7 cm 仿真结果

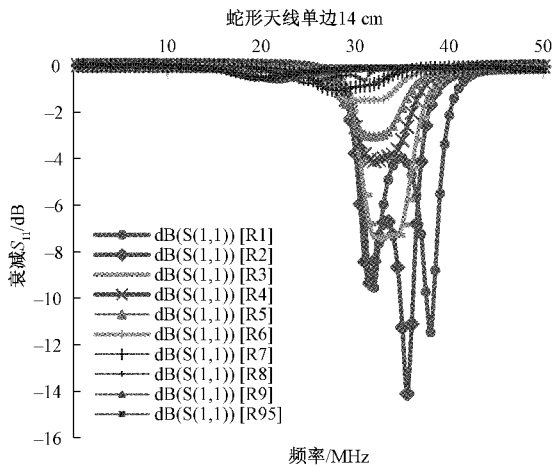


图 8 固定弯折单边长度 14 cm 仿真结果

2) 固定单边天线高度

固定单边天线高度,按照天线线圈的不同弯折数,设计 7、14、28 个弯折数进行仿真计算,得出具体效果如图 10~12 所示。

对比 3 组仿真结果,当单边天线长度固定时,天线的回波损耗 S_{11} 随着弯折数的增加明显提高,频点也随之提高,但频率分支也明显增多,即频率的分散度明显增大,加大了电路设计上滤波处理的难度。虽然回波损耗数值偏低,但是主要由于阻抗匹配未进行模拟,可以通过实物测试来进行弥补。

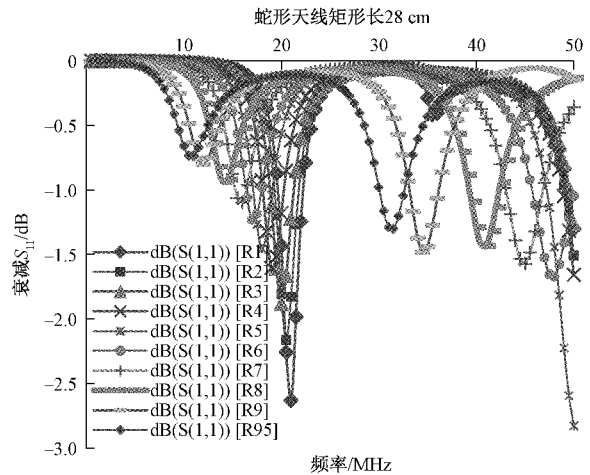


图 9 固定弯折单边长度 28 cm 仿真结果

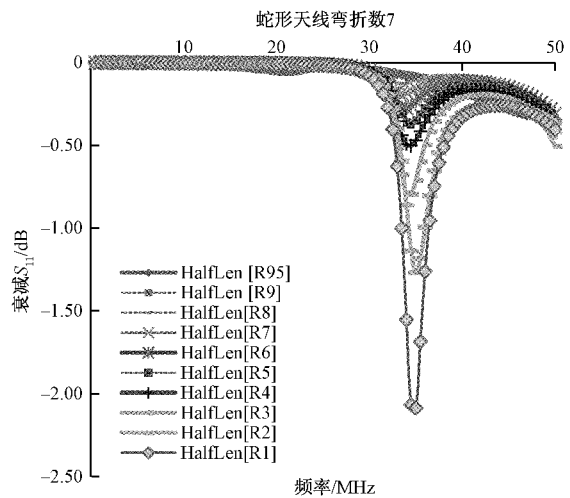


图 10 固定单边弯折数为 7 仿真结果

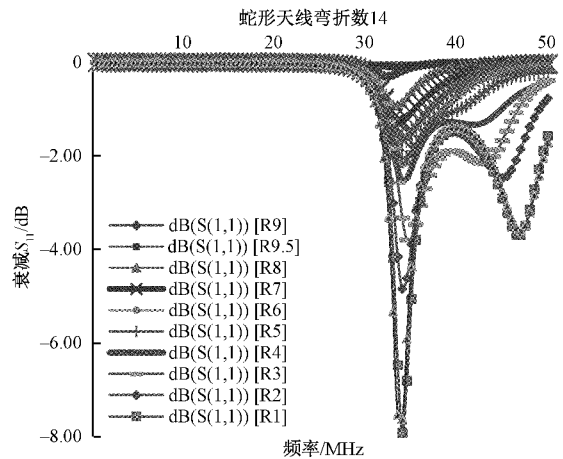


图 11 固定单边弯折数 14 仿真结果

该天线结构的频点分布趋势图如图 13 所示,选取了弯折数 28,单边长度 28 cm 间距从 10~95 mm 的数据点绘制趋势线,可看出随着间距增加频点逐渐提高。

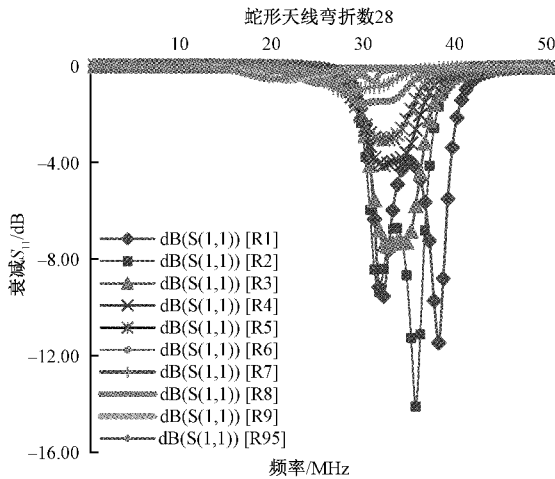


图 12 固定单边弯折数为 28 仿真结果

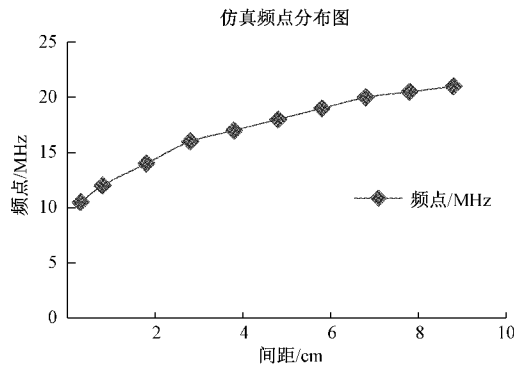


图 13 仿真频点规律图

3 仿真结果与实物对比分析

根据仿真计算规律,设计制作 3 种直径不同的天线实物,使用矢量网络分析仪测试每种天线的衰减参数及频点情况。图 14 为使用示波器测量传输参数 S_{11} 及对应频点,天线单边长度为 7 cm,弯折数为 14 和 28,可看出频率规律和仿真的参数规律完全一致。两个最低衰减值分别出现在 30 MHz 和 40 MHz 附近。图 15 是分别测量天线与钻柱间距为 0.6、1.6 和 4.1 cm 情况下对应频率结果,该频点与仿真频点规律保持一致性。

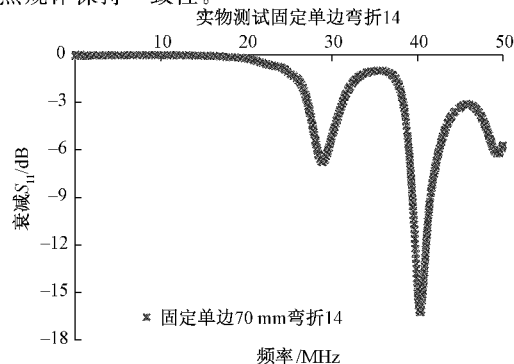


图 14 实物模型在空气中测试结果

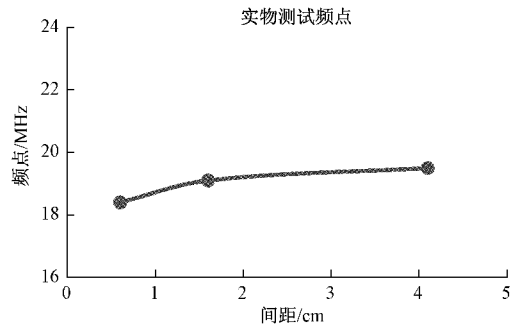


图 15 实物模型频点测试规律

结合仿真与实物测试结果可看出,天线与钻柱之间的间距越大,最佳频点将逐渐提高,信号回波损耗将会越小,即天线传输性能越好。同样蛇形天线的单边长度下,随着弯折数增加,天线长度越长,频点越高,回波损耗会减小,但并不是线性关系。但受井筒尺寸影响,天线的尺寸受到制约,天线与钻柱间的间距需要适当选取。该实物测试都是在空气介质条件下进行,因此,同样适用于油基钻井液情况下信号传输。仿真计算所得频点与实物测试频点偏移规律一致,仿真结果可作为实物设计参数选择依据。

4 结 论

本文根据钻井环境工况需求,采用 HFSS 软件设计磁偶极子天线三维仿真模型,创新将常规应用于毫米波的偶极子天线应用于井下环境,通过研究蛇形天线的长度、弯折数及与钻柱之间的距离等关键参数对天线性能的影响,实现了参数优化设计。据此参数设计的实物实测结果可看出,天线回波损耗特性与实测特性完全一致,天线的仿真模型计算可以方便实现参数优选,达到预期设计目的,回波损耗可达到 -7.5 dB 以下。仿真设计大大减少了实物天线的制作数量,提高了设计效率,实物测试结果证明了蛇形天线结构设计可实现天线回波损耗的降低,提高了天线性能。在此研究工作基础上,未来还需要完善信号采集电路设计及实际环境应用测试等工作,进一步验证天线的实际效果。

参考文献

- [1] 孙成芹,胡永建,李显义,等.基于 HFSS 仿真的感应耦合传输装置设计[J].电子测量技术,2021,44(2):32-33.
- [2] 吴凡.磁电偶极子天线的极化可重构研究[J].电波科学学报,2018,33(3):288-289.
- [3] 陈星,譙丹,陈蓉.基于新型导电壁磁电偶极子天线宽带束设计[J].电子与通讯技术,2021(6):167-171.
- [4] HE K, GONG S X, GAO F. A wideband dual-band magne-to-electric dipole antenna with improved feeding structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2014,13:1729-1732.
- [5] 余文胜,张忠祥,吴先良,等.一种紧凑型双极化电磁偶

- 极子天线设计[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(4): 79-83.
- [6] 王兵, 王志愿, 杨钰琦, 等. 一种基片集成波导馈电的毫米波磁电偶极子天线设计[J]. 空间电子技术, 2021, 18(4): 53-54.
- [7] LI Y J, LUK K M. 60 GHz dual-polarized two-dimensional switch-beam wideband antenna array of aperture-coupled magneto-electric dipoles [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2016, 64(2): 554-563.
- [8] 张晓玲, 徐渊源, 王震, 等. 基于孔径耦合的毫米波宽带圆极化阵列天线[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(3): 52-53.
- [9] 王保懿. 磁偶极子天线及其在可植入、可穿戴系统中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [10] 贺吉. 一款基于 HFSS 仿真的倒 F 蛇型印制天线[J]. 电子测试, 2017(19): 10-11.
- [11] 孙成芹, 胡永建, 李显义, 等. 井下无线感应传输装置 HFSS 仿真设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 96-97.
- [12] 杨晓昆, 张正平. 蛇形单极子天线匹配系统设计优化研究[J]. 通信技术, 2019, 52(3): 724-729.
- [13] 李阳, 张春光, 王壮. 基于 HFSS 的地铁线槽电磁兼容仿真研究[J]. 变频器世界, 2019, 3: 68-69.
- [14] 刘苹, 张小平, 匡斯建, 等. 电机温度场分析中三维有限元模型网格划分方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 173-174.
- [15] 陈宇, 蒋军, 魏东旭, 等. 基于 ADS 的偶极子天线性能参数仿真分析[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(10): 209-211.
- [16] 王琨, 王茂丞, 李宗泽, 等. 基于 HFSS 矩形微带天线仿真与设计[J]. 电脑知识与技术: 学术版, 2019, 15(4X): 3.

作者简介

孙成芹, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向井下随钻仪器测试、算法与仿真等。

E-mail: sunchengqin88@126.com