

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314075

井下 NFC 天线的研究及仿真分析^{*}

张祁梦莎 胡永建 孙成芹 孙琦 张冠杰

(北京石油机械有限公司 北京 102206)

摘要:为实现井下复杂环境中的近场通信,首先用三维有限元电磁仿真软件对铁氧体天线结构进行建模仿真,结果表明:线圈半径、导线半径、天线间距对天线正向传输系数的影响较大,铁氧体相对磁导率的影响较小。其次,为探究井下环境对天线传输性能的影响,用阻抗匹配工具对天线进行阻抗匹配,并建立带钻井液介质的金属钻具模型,结果表明:井下金属环境导致正向传输系数衰减 3.3 dB;钻井液电导率从 0 S/m 增加到 2 S/m 后,正向传输系数衰减 8.2 dB。将天线仿真模型与相同参数的实物模型进行对比,结果表明基本模型正向传输系数误差小于 0.3 dB,扩展模型正向传输系数误差小于 5.5 dB,仿真结果与实物测试结果具有一致性,可指导井下 NFC 天线设计。

关键词:近场通信(NFC);NFC 天线;铁氧体环形天线;天线仿真;阻抗匹配

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

Research and simulation analysis of downhole NFC antenna

Zhang Qimengsha Hu Yongjian Sun Chengqin Sun Qi Zhang Guanjie

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

Abstract: Ferrite antenna is modeled by 3D finite element electromagnetic simulation software to achieve near-field communication in complex downhole environments. The results show that the coil radius, wire radius, and antenna spacing have a significant impact on the forward transmission gain (S_{21}) of the antenna, while the influence of the relative permeability of the ferrite loop is relatively small. To investigate the impact of the underground environment on antenna transmission performance, antenna impedance matching is performed, and a drilling tool model with drilling fluid medium is established. The results show that metals cause 3.3 dB attenuation of S_{21} ; increasing conductivity of drilling fluid from 0 S/m to 2 S/m causes 8.2 dB attenuation of S_{21} . Simulation results and testing results show great consistency, the deviation of S_{21} curve is less than 0.3 dB for the basic model and less than 5.5 dB for the extended model, guiding downhole NFC antenna design.

Keywords: NFC;NFC antenna;ferrite loop antenna;antenna simulation;impedance matching

0 引言

目前,石油钻探行业中井下无线随钻传输方式主要包括钻井液脉冲、电磁波和声波 3 种,其中电磁波和声波的传输距离和可靠性受钻井液和地层影响较大,钻井液脉冲传输因高可靠性和经济性,应用最为广泛^[1-2]。按部署位置,井下传感器可分为水眼中心式和钻铤式两类。由于钻井液脉冲传输中信号发生器位于水眼中,环空压力传感器等钻铤式传感器采集的数据需跨过钻铤内壁连接到水眼总线。传统的钻铤和水眼间的信号传输采用有线连接方式,但有线连接方式制作工艺复杂且装配和维修困难。

近场通信(near field communication,NFC)技术由非接触式射频识别技术和无线互联技术整合演变而来,是一种

近距离无线通信技术^[3]。此技术工作频率为 13.56 MHz,一般传输距离为 10 cm 以内,具有通信距离短、安全性高、便捷性好等优势,已普遍应用于各种手持设备,如手机支付、公共交通、门禁卡等,也被逐渐应用于穿戴领域如运动检测和健康监护^[4-6],但在油气井下应用 NFC 技术的研究十分少见。刘明尧等^[7]提出一种多层井井下数据 NFC 无线传输系统,通过仿真软件改变金属管高度和屏蔽层厚度来研究井下环境及铁氧体屏蔽层对 NFC 线圈磁场强度的影响规律,但未研究天线自身结构,金属钻具和钻井液对线圈传输性能的影响。

本文提出利用 NFC 技术实现钻铤与水眼总线间无线通信,可解决有线连接的弊端。由于 NFC 天线性能会受到

收稿日期:2023-07-11

^{*} 基金项目:中国石油集团公司直属院所基金(2021DQ03-47)项目资助

天线自身结构、金属钻具和钻井液类型的影响,为了设计出适用于井下环境的 NFC 天线,本文通过三维有限元电磁仿真软件分析天线结构和井下环境对传输特性的影响,用电子设计自动化(electronic design automation, EDA)软件实现阻抗匹配,掌握影响 NFC 天线传输性能的因素并总结规律,通过与实物模型测量结果的对比,验证两者的一致性。

1 系统结构

如图 1 所示,为实现钻铤式仪器与水眼总线间的无线通信,在水眼中放置了一对铁氧体环形天线。天线 1 与钻铤中的传感器相连,固定在与钻铤连通的金属支架上。天线 2 与水眼总线相连,固定在工具串底部。两天线结构完全相同,间隔 10 mm 同轴放置,通过磁耦合方式完成钻铤与水眼工具间的信号传输。天线结构如图 2 所示,铁氧体磁环为中空圆柱体,在其表面绕有一圈铜导线,两天线同轴相对而放,增大磁通面积。

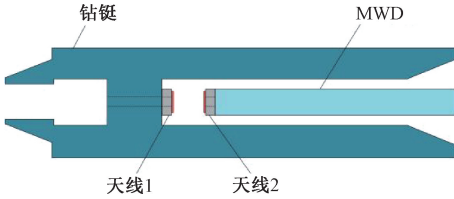


图 1 信道与基本模型示意

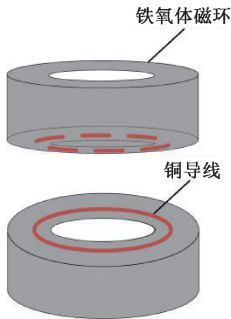


图 2 铁氧体环形天线示意

NFC 天线结构决定了天线的输入阻抗、谐振频率、品质因数、增益等天线特性参数^[3,8]。环形天线成本低、工艺简单,工作在高频段,是 NFC 应用领域常用的一种天线结构^[9]。金属环境下天线的阻抗匹配、散射参数、天线辐射等参数会急剧恶化,缩短天线通信距离,甚至导致天线无法正常工作^[10]。高磁导率、低磁损耗的铁氧体磁片可降低天线电磁场在金属表面产生的涡流损耗,并减小与金属环境相互耦合而发生的谐振点偏移^[9,11]。油气井下不仅有钻铤和钻具等金属还存在大量钻井液,高频电磁波在电解质中会有较大的衰减,所以大部分井下无线通信都使用低频段,传输速度较低且多为单向通信,因此对高频井下无线双向通信技术的研究十分必要^[12]。根据电气和电子工程师学会制定的频谱划分表^[13],NFC 的工作频率就处在高频段。本

文主要研究在 13.56 MHz 附近,铁氧体环形天线结构和井下环境对天线传输性能的影响。

本文选择 S 参数作为研究天线特性的重要依据。S 参数即散射参数,可描述传输通道的频域特性。本文的天线系统相当于一个二端口网络。设 Port1 为信号输入端口,Port2 为信号输出端口,则 S_{11} 表示输入回波损耗,即有多少能量被反射回源端, S_{21} 表示正向传输系数,即有多少能量被输入到负载端^[14-15]。

2 基本仿真模型

基本仿真模型是实物的简化,模型包括铁氧体环形天线和金属钻具,其仿真结果被用来和实物模型测试结果进行对比,验证两者的一致性,目的是利用仿真方法代替物理测试,进行大量的虚拟测试与验证,降低开发成本。

本文利用三维有限元电磁仿真软件进行铁氧体环形天线的建模和仿真,主要关注的参数为正向传输系数和回波损耗。在仿真环境中定义螺旋体结构完成环形天线的绘制;定义圆柱体结构完成铁氧体磁环和金属钻具的建模;定义立方体介质腔体并设置辐射边界条件。难点在于端口激励方式的设置以及模型参数设计。由于环形天线被周围的金属钻铤包裹,激励在模型内部的天线铜导线处,因此采用集总端口激励方式。在建模时需着重设计参数变量,使得仿真时模型根据变量自动变化求解。其中集总端口的设计较为复杂,设计者设置了天线最小尺寸后用长方体对环形天线进行切割后,在缺口处用长方形绘制集总端口,其坐标和边长根据天线尺寸的增量和天线线径变化。模型采用有限元求解方法,模式驱动求解类型。

根据常规 172 mm 钻铤尺寸和常规 58 mm MWD 井下仪器尺寸设置了金属模型尺寸参数,表 1 为天线基本模型尺寸参数。

表 1 铁氧体环形天线尺寸参数 mm

参数	数值
铜导线半径	0.2
线圈半径	13
铁氧体磁环高度	6
铁氧体磁环外半径	15.2
铁氧体磁环内半径	10.8
天线间距	10

线圈材料选用铜,钻具材料选用不锈钢,磁环材料选用镍锌铁氧体,立方体介质腔体选用空气填充,基本仿真模型材料参数如表 2 所示,模型结构如图 3 所示。

表 2 材料参数

参数	数值
铜线圈电导率/ $(S \cdot m^{-1})$	5.8×10^7
金属钻具电导率/ $(S \cdot m^{-1})$	1.1×10^6
铁氧体磁环相对磁导率	100

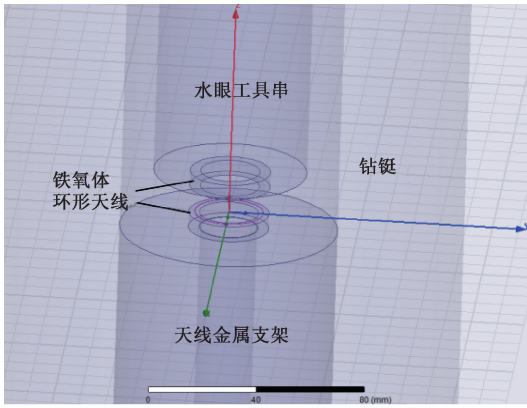


图3 基本仿真模型

3 天线结构对传输性能的影响

3.1 验证

为了验证建模的准确性,按照基本仿真模型中铁氧体环形天线参数制作了两个天线。采用安捷伦 E5061B 网络分析仪对实物模型进行测量。将两天线间隔 10 mm, 分别接入网络分析仪的 Port1 和 Port2, 测量天线在空气中的 S_{21} 参数并与基本仿真模型的结果进行对比。如图 4 所示, 随着频率的增高, S_{21} 参数曲线缓慢上升, 在 13.56 MHz 时 S_{21} 值接近 -25 dB。两曲线高度重合, 误差在 0.3 dB 以内。由此得知仿真模型与实物模型特性相近, 可改变基本仿真模型的各项参数进行仿真分析从而代替实物实验。

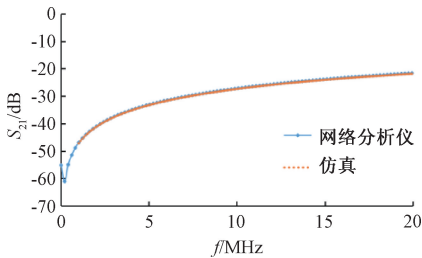


图4 实物与仿真天线性能对比

3.2 天线结构特性仿真

求解频率为 13.56 MHz, 选择快速频率扫描, 起始频率 1 MHz, 截止频率 30 MHz, 步长 0.01 MHz。

1) 线圈半径的影响

设置线圈半径为参数扫描变量, 起始值为 8 mm, 截止值为 28 mm, 步长为 5 mm。如图 5(a) 所示, 不同线圈半径天线的 S_{21} 参数曲线均在低频时上升较快, 高频时上升减缓。如图 5(b) 所示, 在 13.56 MHz 时, S_{21} 曲线随线圈半径的增加呈现先快速增加后逐渐平缓的趋势; 当频率为 30 MHz 且线圈半径大于 23 mm 时, S_{21} 曲线成下降趋势。

单圈环形天线自感可用经验公式表示^[16]:

$$L = \mu_0 R \left[\ln \left(\frac{16R}{r} \right) - 1.75 \right] \quad (1)$$

其中, r 为导线半径, R 为线圈半径。由式(1)可知天

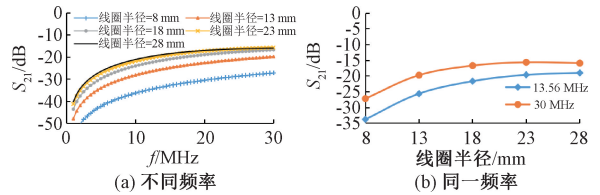


图5 不同线圈半径模型的仿真结果

线自感与线圈半径成正比, 但天线尺寸和频率的增加, 可导致线圈的内阻增加, 且线圈距离金属钻铤越来越远, 可导致传输性能下降。

2) 导线半径的影响

设置线圈导线半径为参数扫描变量, 研究导线粗细对 S_{21} 传输曲线的影响。如图 6(a) 所示, 导线半径大于 0.2 mm 时, 导线半径越大 S_{21} 越小, 与式(1)中天线自感与导线半径成反比相吻合。如图 6(b) 所示, 频率为 30 MHz 的曲线中, 导线半径为 0.05 mm 时 S_{21} 值小于导线半径为 0.2 mm 时 S_{21} 值, 可知当导线半径过小和频率过高时集肤效应明显, 导致传输性能下降。

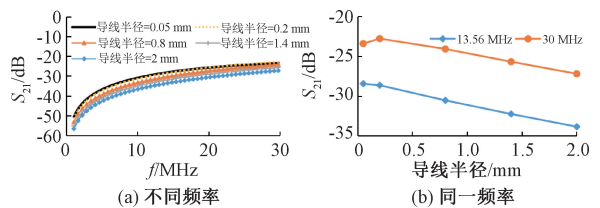


图6 不同导线半径模型的仿真结果

3) 铁氧体磁环相对磁导率的影响

设置铁氧体磁环相对磁导率为参数扫描变量, 起始值为 100, 截止值为 500, 步长为 100。如图 7 所示, 在天线尺寸和铁氧体磁环尺寸固定时, 5 条不同磁导率的 S_{21} 曲线基本完全重合, 说明铁氧体相对磁导率的变化对天线传输性能影响不大。

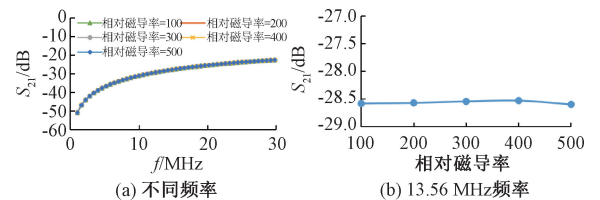


图7 不同铁氧体相对磁导率模型的仿真结果

4) 线圈间距的影响

设置线圈间距为参数扫描变量, 起始值为 5 mm, 截止值为 30 mm, 步长为 5 mm。如图 8 所示, S_{21} 与天线间距成反比, 频率为 13.56 MHz 时, 间距每增大 5 mm, 增益平均下降 4.3 dB。天线垂直距离增大导致磁通量减小, 耦合系数减小, 使天线传输性能下降。因此, 为保证天线传输质量应避免两天线间距过大。

综上所述, 线圈半径、导线半径和线圈间距的变化均会影响天线传输性能, 铁氧体磁环相对磁导率的变化对天线

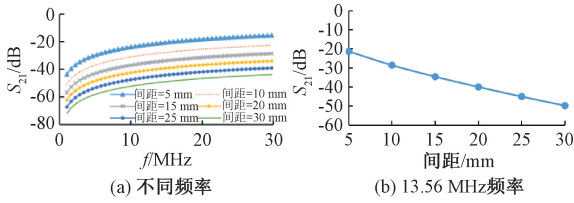


图 8 不同天线间距模型的仿真结果

传输性能影响较小。为了在 13.56 MHz 达到功率传输的最大化,需要对天线进行 50 Ω 阻抗匹配。

4 井下环境对传输性能的影响

为了研究最佳功率传输条件下井下环境对天线传输性能的影响,用阻抗匹配工具对铁氧体环形天线进行阻抗匹配,并在基本仿真模型内加入匹配电路形成扩展仿真模型,在扩展仿真模型的基础上通过改变天线外部金属和介质环境探究钻具和钻井液对天线传输特性的影响。

4.1 阻抗匹配

由于很难通过改变天线自身结构来达到 13.56 MHz 的谐振频率,并且天线不可能与 50 Ω 电缆完全匹配,因此需要进行阻抗匹配来保证能量从源端到负载端的有效传输。图 9 为串联电阻匹配电路,其中电阻的作用是用来调节天线 Q 值和带宽。

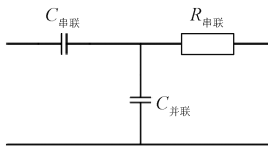


图 9 串联电阻阻抗匹配电路

Q 值即品质因数,对谐振线圈传输性能有重大影响,Q 值越大带宽越窄,电路的选择性越好,Q 值的理论表达式为^[17]:

$$Q = \frac{2\pi fL}{R} \quad (2)$$

其中, f 为谐振频率, L 为电感, R 为串联电阻。

采用基本仿真模型中的铁氧体环形天线参数进行单个天线的扫频分析,得出 13.56 MHz 时天线输入阻抗为 $0.086 + j9.23 \Omega$,然后在 EDA 软件中进行天线与 50 Ω 传输线的阻抗匹配,如图 10 所示。

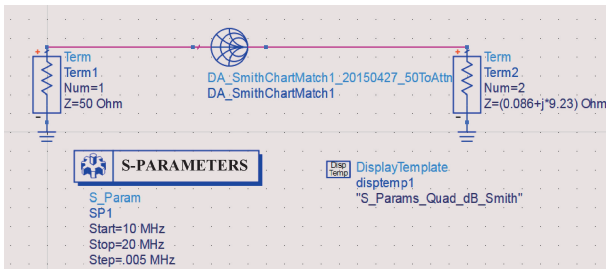


图 10 阻抗匹配

天线输入阻抗会受到天线间距和周围环境的影响,应选择适合的 Q 值来设定天线的工作带宽。选择串联电阻匹配方式,通过改变串联电阻阻值来调节 Q 值大小,通过改变电容容值来调节谐振频率。利用 EDA 中的史密斯圆图工具进行阻抗匹配,确定串联电阻为 1.3 Ω,串联电容为 460 pF,并联电容为 1.15 nF。

在三维有限元电磁仿真软件中通过设置 RLC 边界条件建立带阻抗匹配电路的天线模型,如图 11 所示。

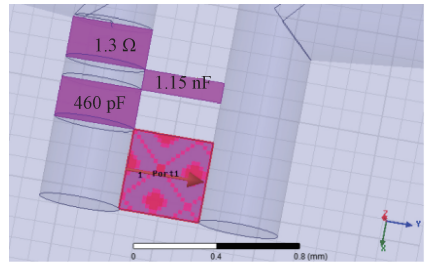


图 11 RLC 边界条件

图 12 为添加 RLC 边界条件后的单个天线回波损耗曲线,仿真天线在 13.56 MHz 达到了 -26.5 dB。

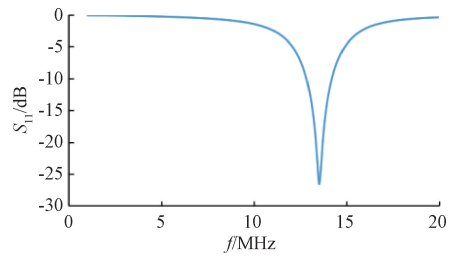


图 12 S₁₁ 仿真曲线

4.2 验证

首先利用网络分析仪测量相同参数的实物天线阻抗并根据图 9 的串联电阻匹配电路在 EDA 中进行 50 Ω 阻抗匹配,然后在天线的输入端加入阻抗匹配电路并用网络分析仪测量 S 参数。图 13 为拓展仿真模型的仿真结果与实物测量结果的对比图。S₂₁ 仿真曲线和实测曲线基本吻合,差距小于 5.5 dB。误差主要由于实物天线为手工绕制且无封装,在测量过程中会造成阻抗变化,且匹配电路也会引入额外的误差。

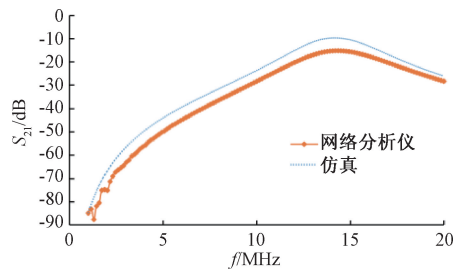


图 13 仿真与实物天线传输性能对比

4.3 仿真分析

1) 有/无金属对比

图 14 为改变扩展仿真模型中天线的外部金属条件的 S_{21} 参数对比图。与无金属环境下的天线传输效果相比,金属环境使 S_{21} 在 13.56 MHz 下降了 3.3 dB,且由于金属改变了天线的输入阻抗,导致谐振峰偏移了 0.7 MHz。

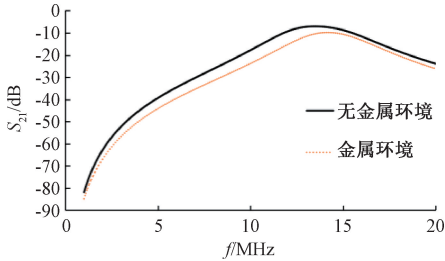


图 14 有/无金属模型仿真结果对比

2) 不同电导率环境对比

在扩展仿真模型中通过改变介质腔体电导率来模拟不同钻井液下的天线 S_{21} 参数曲线:用空气模拟油基钻井液;用 0.2、0.5、2 S/m 的介质模拟不同电导率的水基钻井液。如图 15 所示,信号衰减随着电导率的增大而增大,且与空气曲线相比,电导率为 2 S/m 的 S_{21} 曲线在谐振点处下降了 8.2 dB。

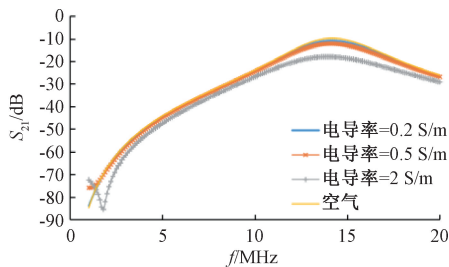


图 15 不同介质电导率模型仿真结果对比

综上所述,金属和高电导率钻井液介质会对天线信号造成衰减,由此可以判断天线在水基钻井液环境比在油基钻井液环境中的传输效率低。

5 结 论

本文提出用 NFC 技术实现井下水眼式仪器和钻铤式仪器间的高速无线通信。在电磁仿真软件中建立基本仿真模型和扩展仿真模型,利用电子设计自动化软件对天线进行阻抗匹配。结合两个软件的优势,研究铁氧体环形天线的线圈半径、导线半径、铁氧体磁导率和天线间距等关键参数以及金属钻具和钻井液介质对 NFC 天线传输性能的影响,得到如下结论:

在频率较低且天线线圈半径较小时, S_{21} 与线圈半径成正比,但天线尺寸和频率的增加,可导致线圈的内阻增加,且线圈距离金属钻具越来越远,可导致传输性能下降;

在频率较低时 S_{21} 与导线半径成反比,但过小的导线

直径和过高的频率可使集肤效应明显,导致传输性能下降;铁氧体磁环相对磁导率的变化对天线传输性能影响较小;

增大两天线垂直距离会导致天线传输性能下降,在频率为 13.56 MHz 时,间距每增大 5 mm, S_{21} 平均下降 4.3 dB;

金属钻具和高电导率钻井液介质均会对天线信号造成衰减,且天线输入阻抗会随环境发生变化,导致谐振频率的偏移,应选择较低的 Q 值来保证天线工作带宽。

将天线仿真模型与相同参数的实物模型对比,结果显示基本仿真模型与实物模型正向传输系数误差小于 0.3 dB,增加匹配电路后的扩展仿真模型与匹配后的实物模型正向传输系数误差小于 5.5 dB。仿真结果与实物测试结果具有较高的一致性,因此可利用仿真指导实际井下 NFC 天线设计,大大减少实物天线的制作,为在井下利用 NFC 技术解决水眼和钻铤间无线通信的难题提供了重要参考。未来还需要设计基于 NFC 技术的无线收发器电路并进行测试与现场试验。

参考文献

- [1] 胡永建,黄衍福,刘岩生. 高频磁耦合有缆钻杆信道的联合仿真设计[J]. 石油学报, 2019, 40(4): 475-481.
- [2] 贾梦之,耿艳峰,闫宏亮,等. 高速泥浆脉冲数据传输技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 160-170.
- [3] 郑聪,邹艳玲,胡吉永,等. 可穿戴 NFC 织物天线及能量传输的研究进展[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 37-46,67.
- [4] 杨锴,陆晓霞,吴震星,等. 金属外壳手机低干扰 NFC 天线设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(8): 783-788,796.
- [5] 孙英,花赛月,刘乃源,等. 变形工作状态下非等间距柔性 NFC 标签天线设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 57-66.
- [6] 余思琦,孙科,郑照阳. NiCuZn 铁氧体磁片在 NFC 天线中的应用及仿真分析[J]. 磁性材料及器件, 2018, 49(1): 40-42,72.
- [7] 刘明尧,孙洋,宋涵,等. 多层井井下数据 NFC 无线传输系统磁场分布规律[J]. 石油机械, 2018, 46(4): 107-111.
- [8] 刘璐,郝鹏,刘维亭. 基于 HFSS 和无线充电的线圈天线设计[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(3): 111-114.
- [9] 陈攀,李高升. 基于铁氧体的宽带高增益微带天线设计[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 134-138,219.

- [10] 刘晓毅, 贺君, 颜钰清, 等. 柔性 Co₂Z 铁氧体基板对 UHF-RFID 标签天线抗金属特性的影响[J]. 磁性材料及器件, 2023, 54(2): 56-61.
- [11] 胡永建, 王岚. 基于线性仿真的高频磁耦合有缆钻杆信道建模[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(2): 120-126.
- [12] 范业活, 李天禄, 杨志强. 随钻无线传输技术分析与比较[J]. 测井技术, 2016, 40(4): 455-459.
- [13] 孙成芹, 胡永建, 张国田, 等. 新型井下磁偶极子蛇形天线仿真设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(10): 14-19.
- [14] 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): 96-101.
- [15] 胡永建, 黄衍福, 石林. 高频磁耦合有缆钻杆信道建模与仿真分析[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1292-1298, 1316.
- [16] 曹娟, 张婉青, 徐年富, 等. 平面圆形螺线圈电感参数计算[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(10): 86-90.
- [17] 孙英, 刘乃源, 翁玲, 等. 基于镓基液态金属的高带宽柔性 NFC 标签天线设计及特性测试[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 216-225.

作者简介

张祁梦莎(通信作者), 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为测试测量技术。

E-mail: zhangqimengsha@163.com