

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902604

# 井下无线感应传输装置 HFSS 仿真设计\*

孙成芹 胡永建 李显义 黄衍福 孙 琦 张冠杰

(中石油工程技术研究院北京石油机械有限公司 北京 102206)

**摘要:**为了改进特殊有缆钻具制造工艺复杂的现状,提出了一种基于 HFSS 软件的井下无线感应信号传输装置仿真模型。通过建立感应式和谐振式仿真模型,计算仿真信号传输特性,验证设计模型的关键参数如匝数、螺距、包裹材料等对传输特性的影响。通过分析仿真模型的结果校正设计方案,得出传输衰减减小、可实际应用的仿真模型,进而指导实物模型设计,提高研发效率,降低研发成本。测试结果表明,无线感应耦合信号传输模型具有可行性,与实物具有良好的一致性,衰减误差可在-5 dB 以内,为实物制作提供了重要依据。

**关键词:** HFSS 仿真;感应耦合;信号传输

**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

## Design of HFSS simulation model for down-hole wireless induction signal transmission

Sun Chengqin Hu Yongjian Li Xianyi Huang Yanfu Sun Qi Zhang Guanjie

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

**Abstract:** This model design of high frequency wireless induction signal transmission device is based on HFSS simulation software, in order to improve the complex manufacturing process of special wired drilling tool. By establishing induction and resonance simulation models, the simulation signal transmission characteristics are calculated and compared with the physical model to verify the influence of the parameters of the design model, such as turns, pitch, wrapping material, on the transmission characteristics. By analyzing and correcting the design scheme through the simulation results of the model, a simulation model with high consistency with multiple physical models is obtained, which can guide the design of physical models, and greatly improve the efficiency, reduce the cost and save the time of R&D. Through the model simulation method designed in this paper, the feasibility of wireless induction coupled transmission is verified. It is highly consistent with the physical model, deviation can be less than -5 dB, which provides an important basis for the physical production.

**Keywords:** HFSS simulation; induction; signal transmission

## 0 引 言

当前,高频磁耦合感应传输是无线传输研究的热点,具备无线、高耦合效率等特点,在各个行业已有多种新型应用的探索。在石油钻井过程中,常规的传输方法是使用钻井液或电磁波、声波等,传输速率极低,最高仅为几十比特每秒<sup>[1-2]</sup>,目前传输速率最快的商业化产品是有缆钻杆传输,其结构为钻杆接头连接处使用感应耦合方式

连接,在钻杆内部敷设同轴电缆的方式,可实现深井数据传输,并可以传输振动等井下监测数据<sup>[3-4]</sup>。但电缆敷设对于常规标准钻杆可以批量制造,对于特殊井下钻具如各种不同型号的扶正器、震击器等,将需要全部重新设计、测试、试验,工作量大、可靠性低。如果能使用无线感应耦合方式,则不需要电缆敷设,只需将此类钻具两端装上感应线圈,通过无线感应耦合传输,即可将信号在单个短节中传输,将会大大降低研制成本,提高传输效率。

本文所设计的仿真模型,使用 HFSS 软件,具有仿真

收稿日期: 2019-09-20 Received Date: 2019-09-20

\* 基金项目:“十三五”国家科技重大专项(2016ZX05020005)资助

精度高、仿真速度快、可靠性高等特点,是高频结构设计的首选工具,并广泛地应用于航空、航天、电子、半导体、计算机、通信等多个领域<sup>[5]</sup>。从理论上验证感应耦合方式的可行性,并与实物模型进行比对,二者具有高度一致性时,可为实物设计提供重要的参考价值。

## 1 钻柱磁耦合感应传输原理

### 1.1 系统介绍

传统的磁耦合通信整体技术模型如图 1 所示,钻井工程中钻柱上感应线圈的磁耦合感应传输和传统的基本原理相同,发射和接收线圈是主要传输部件,主要区别在于钻柱所处的工作环境为井筒,内部充满钻井液,周围环境为地层,与常规的空气介质的绝缘性相比有较大差距。因此,需要根据钻井井下应用的真实环境设计仿真模型,才能最大程度上接近实际应用情况,并研究不同介质情况下的模型特性。

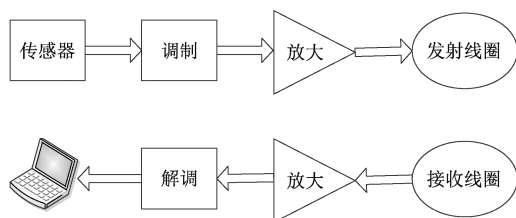


图 1 传统的磁耦合通信整体技术<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Integral flow chart of traditional magnetic coupling

## 2 HFSS 感应耦合模型建立

常用的感应耦合方式可分为两种<sup>[3,6-7]</sup>,感应式和谐振式两种,均为电磁感应原理,是电磁场近场的磁耦合无线电能传输方式,是一种技术的两种不同的表现形式。其传输原理如图 2 所示。

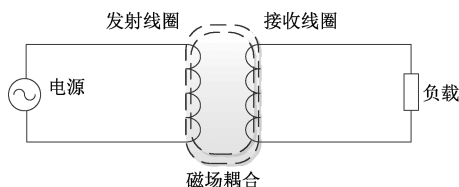


图 2 感应耦合传输原理

Fig. 2 Diagram of coupling transmission

### 2.1 感应式线圈模型建立

感应耦合电路模型结构如图 3 所示。

HFSS15 版本以上具有三维螺旋线模型,直接使用螺旋线即可绘制仿真天线,主要难点在于端口激励方式、扫

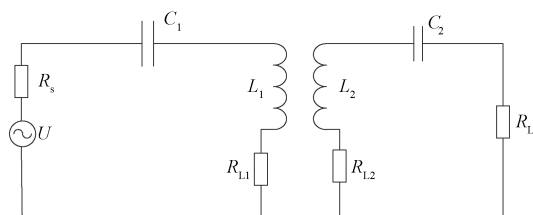


图 3 感应耦合电路模型<sup>[6]</sup>

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of inductive coupling

描频率选择、有限元 FEM 自适应网格剖分参数设计、迭代参数设计等<sup>[8-9]</sup>。尤其是端口激励方式最为关键<sup>[10]</sup>,常用的端口激励有 2 种方式,波端口激励(wave port)和集总端口激励(lumped port),其中波端口激励方式适用于激励端口在模型外部的情况,由于本设计中激励端口处于线圈端面,并需要将整个模型放入介质腔体中,端口处于模型内部,因此,选择集总端口激励方式<sup>[3]</sup>。

设计单圈感应式模型,外部使用充满介质的立方体介质腔体,采用常见介质如水、真空、盐水等,模拟真实井筒环境,中心结构使用金属材料圆柱体,模拟实际应用中的井下普通钢制钻杆及钻具,单圈结构如图 4 所示。

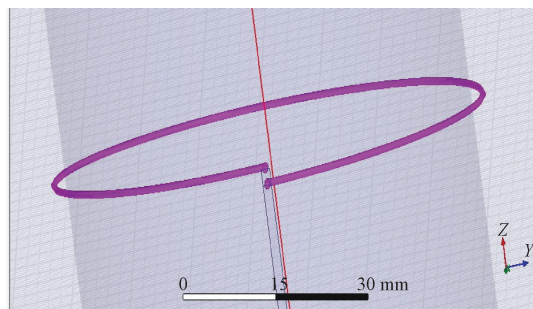


图 4 单圈感应式模型

Fig. 4 Model of single coil inductive coupling

### 2.2 谐振式线圈模型

谐振式电路模型结构如图 5 所示。

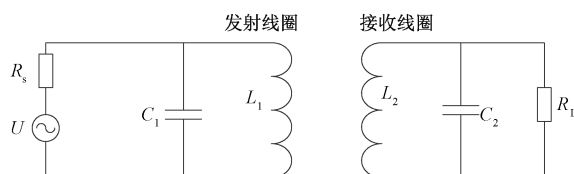


图 5 谐振式电路模型

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of resonance coupling

该电路结构需在端口处需要串联谐振电容<sup>[11-12]</sup>,选择常用的集总端口,谐振电容需要特殊选择。HFSS 软件中并没有单独的电容仿真模型,只有集总 RLC 边界可以设计电容参数,集总 RLC 边界条件的表面切向电场分

量为<sup>[2]</sup>:

$$E_{tan} = Z_s \times (n \times H_{tan}) \quad (1)$$

式中: $Z_s = R_s + jX_s$ ,  $Z_s$  是以  $\Omega/\text{square}$  为单位的表面阻抗; $n$  是表面法向单位矢量; $H_{tan}$  是磁场的表面切向分量。与阻抗边界条件不同的是,用户不需要自己计算提供单位为  $\Omega/\text{square}$  的表面阻抗,只需要给出集总  $R/L/C$  的真实值,HFSS 软件会自动计算出工作频率下的表面阻抗<sup>[13]</sup>。

该模型用法参考资料较少,通过尝试多种设计方案,最终得以验证有效。设计矩形电容模型,位置处于模型的端口边缘,但必须与端口独立放置,使用联合 ADS 仿真需要导出参数模型加以验证,效果和联合仿真完全一致<sup>[14]</sup>,并且不增加仿真运算时间。

设计单圈谐振式仿真模型如图 6 所示。

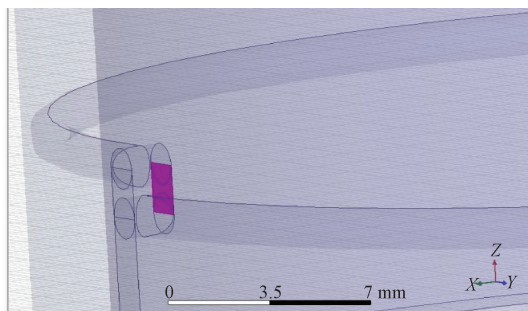


图 6 单圈谐振式模型

Fig. 6 Model of single resonance coupling

### 3 模型仿真特性分析

#### 3.1 感应式模型参数影响

HFSS 拥有电性能分析功能强大的后处理器,能计算任意形状三维无源结构的  $S$  参数和全波电磁场,可以方便计算  $S$  参数、 $Y$  参数、 $Z$  参数、差模/共模传输线特性、电场、磁场等。

以感应式结构为例,设计感应线圈模型,考察思路为单纯改变某一个参数,如线圈数量、线圈直径或外包裹层厚度参数,保持其他参数不动,比较改变参数后的结果。考察信号传输效果使用  $S$  参数,也就是散射参数。 $S$  参数是建立在入射波、反射波关系基础上的网络参数,适于微波电路分析,以器件端口的反射信号以及从该端口传向另一端口的信号来描述电路网络<sup>[15]</sup>。 $S_{12}$  为反向传输系数,表示隔离。 $S_{21}$  为正向传输系数,即增益。 $S_{11}$  为输入回波损耗, $S_{22}$  为输出回波损耗。传输效果可采用参数  $S_{21}$  来比对。经过测定,线圈匝数、包裹材料及介质材料对  $S_{21}$  参数影响较大,比较如下。

##### 1) 线圈匝数影响

线圈的匝数、线圈半径、螺距和外包裹层的厚度,均

对仿真结果有一定的影响。漆包线线径为 0.9 mm,螺距为 2 mm 时,单纯比较匝数的衰减性能,线圈使用 1、3、5 圈对比如图 7 所示。同等参数情况下,匝数多会显著增加模型仿真计算时间,降低传输衰减,但随着模型复杂度增加,并不表现为绝对线性。

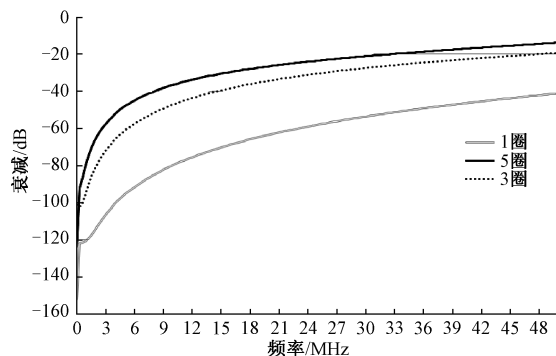


图 7 不同圈数线圈对比

Fig. 7 Diagram of different turns of coil

##### 2) 线圈包裹材料不同的影响

图 8 所示是螺旋线外包裹材料的对比情况,聚酰亚胺材料是介于良导体和绝缘体(空气)之间的材料,用于模拟漆包线漆皮,由于影响因素差距均可以到 -20 dB 以上,因此,不能只考虑单一因素的绝对影响。

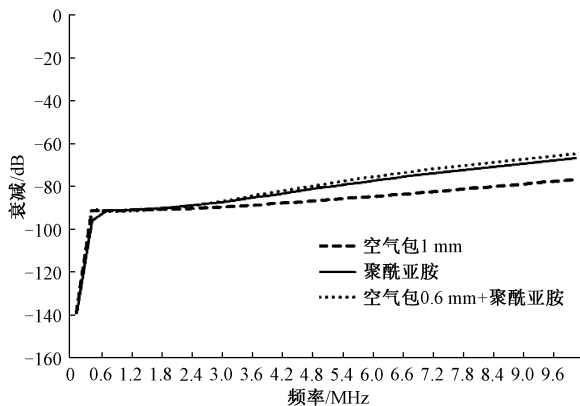


图 8 单根线圈不同包裹材料性能对比

Fig. 8 Diagram of different wrap material of single coil

##### 3) 介质电导率影响

考察不同介质不同电导率情况下,  $S_{21}$  参数情况,模拟实际工作将会遇到的水、钻井液等高电导率情况。

单圈模型,线圈使用漆包线直径 1.5 mm,间距 1.8 mm,两个线圈距离 5 mm,介质水的电导率为 0.01 S/s,扫频范围从电导率 0.1 S/s 开始,步长 1,增加到 8 S/s,10 M 扫频仿真结果如图 9 所示,曲线排列顺序从上到下依次为电导率从 0.1 ~ 1 S/s。当电导率较低时 (<2),  $S_{21}$  增长提高较快,但电导率继续增加,  $S_{21}$  的增长的趋势在放缓。

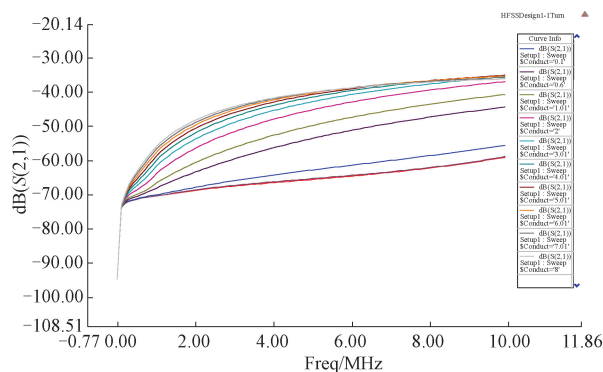


图9 扫频效果

Fig. 9 Diagram of different frequency

感应式线圈仿真从空气介质到模拟浓盐水介质,电导率为  $0 \sim 8 \text{ S/s}$  范围扫频的结果可看出,随着频率升高,衰减有所减小,但曲线较为平滑,没有显著波峰或波谷,规律基本一致。

#### 4) 不同线圈包裹材料的影响

使用聚酰亚胺包裹材料的 5 圈仿真模型,线径为  $0.36 \text{ mm}$ ,螺距  $0.5 \text{ mm}$ ,步长  $1 \text{ k}$ ,扫频  $10 \text{ M}$ ,仿真计算结果  $S_{21}$  参数在不同介质下曲线比较图如图 10 所示。

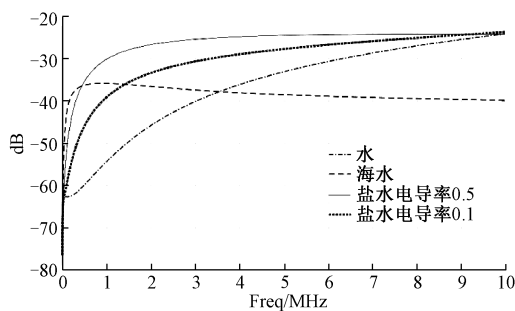


图10 不同介质比较

Fig. 10 Diagram of different permittivity

综上所述,使用感应式耦合传输方式, $S_{21}$  性能曲线较为平稳,并且在不同介质中基本保持不变,整体信号衰减较大,没有明显的传输性能高的频率峰值。线圈包裹材料对线圈传输的影响不大。

### 3.2 谐振式线圈仿真

谐振式仿真需要使用并联电容模型,增加了结构复杂度,具体设计模型参数如下。

使用原单圈模型,端口仍为集总端口激励,线圈外包裹聚酰亚胺材料,单圈模型漆包线直径  $1.5 \text{ mm}$ ,间距  $1.8 \text{ mm}$ ,两个线圈距离  $5 \text{ mm}$ ,内侧厚度  $1 \text{ mm}$ ,外侧  $0.2 \text{ mm}$ ,增加 RLC 矩形面,电流方向与激励端口相同,电容值  $560 \text{ pF}$ ,仿真计算结果如图 11 所示,从频率坐标为  $10 \text{ MHz}$  处看对应衰减曲线,排列在上方的曲线是空气介

质情况,下方是盐水介质。

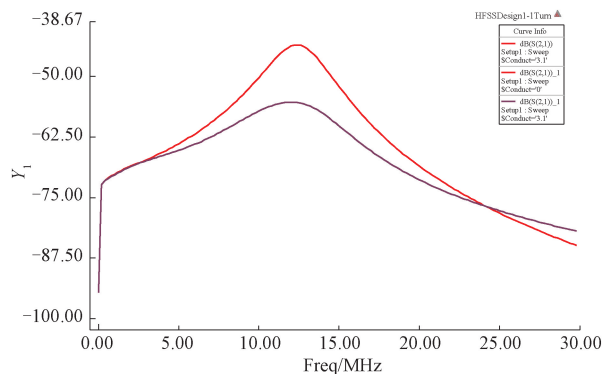


图11 谐振式仿真结果

Fig. 11 Result of resonant simulation

端口同样采用集总端口激励方式,增加 RLC 矩形面,电流方向与激励端口相同,单圈模型  $560 \text{ pF}$ ,增加了 PerfectE 连接。扫频不同电导率数值从  $1 \sim 4 \text{ S/s}$ ,  $S_{21}$  参数情况如图 12 所示,从频率坐标为  $15 \text{ Hz}$  处看对应衰减,曲线排列顺序从上到下依次为电导率从  $1 \sim 4 \text{ S/s}$ 。

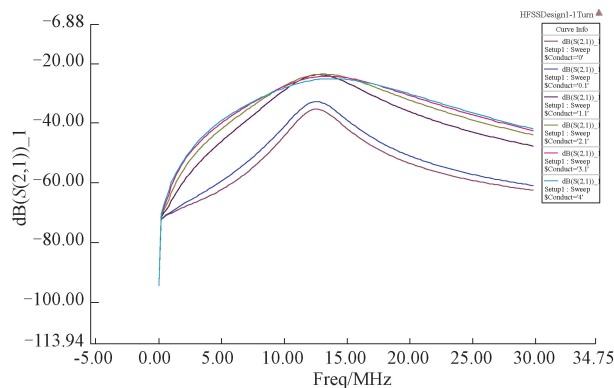


图12 谐振式仿真扫频结果

Fig. 12 Result of resonance simulation

从图 12 可看出,谐振式仿真模型衰减曲线具有峰值,衰减较小的部分集中于一定频段内,并且在不同介质条件下均呈现一定规律,稳定可靠。

## 4 模型与实物特性比对

### 1) 感应式模型比对

将感应式仿真模型与实物模型测量进行比对,线径  $0.9 \text{ mm}$  线径的模型感应式仿真结果如图 13 所示。

仿真效果图如图 13 所示,与实物测量结果图 14 相比,  $S_{21}$  曲线趋势完全一致,衰减数值误差在  $-5 \text{ dB}$  以内,具有高度一致性。

### 2) 谐振式模型与实测比对结果分析

谐振式感应耦合频点稳定,具备实际应用价值。实



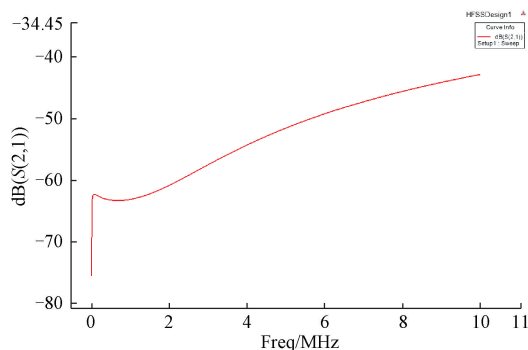


图 13 感应式模型仿真结果

Fig. 13 Result of inductive coupling model simulation

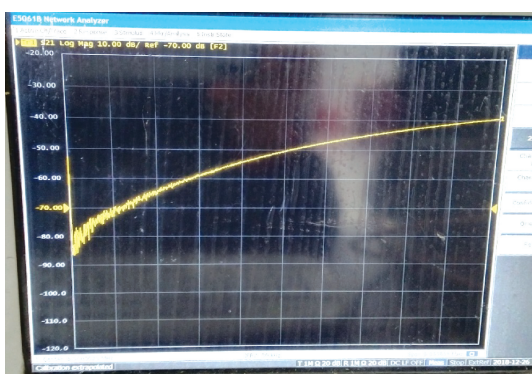


图 14 感应式实物实测结果

Fig. 14 Result of inductive coupling real model

物模型分别放置在空气和盐水中,为了便于比较,将两种测量结果数据从测试设备中拷贝出来,使用 Excel 处理后进行比较,如图 15 所示,规律变化基本一致。比较电导率为 0 S/s(空气)和 3.1 S/s(盐水,模拟钻井液)的情况下,比较如图 15 所示,从频率坐标为 15 MHz 处看对应衰减曲线,排列在上方的曲线是盐水介质情况,下方是空气介质。

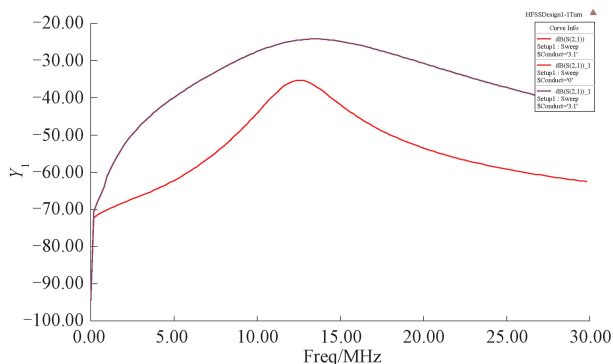


图 15 谐振式模型仿真结果

Fig. 15 Result of resonance model simulation

如图 16 所示,中心频点位置位于上面的一条衰减低于 -20 dB 的曲线是在盐水中传输的结果,下面的曲线衰减较大是在空气中传输的结果。图 15 的仿真计算结果和图 16 的实测结果具有高度一致性,空气中的仿真结果与实测最接近,最小衰减误差可在 -5 dB 以内。

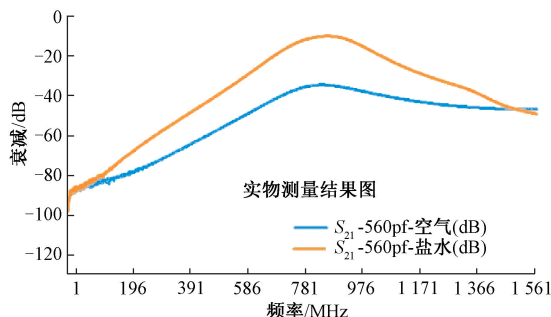


图 16 谐振式实物实测结果

Fig. 16 Result of resonance real model

## 5 结 论

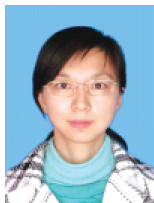
HFSS 与 ADS 等建模软件相比,在构建三维实物仿真模型方面具有模型种类多,设计简便实用等优点。通过建立感应式和共振式 HFSS 仿真模型,计算仿真信号传输特性,找出模型设计的关键参数如匝数、螺距、包裹材料等与传输特性的对应规律,最终设计出传输衰减小、效率更高的谐振式仿真模型。据此制作实物模型,通过与实物模型比对测试表明,仿真模型与实物具有良好的一致性,衰减误差在 -5 dB 以内。本文的仿真设计方法可模拟真实感应耦合与实物之间的关系,实现参数选择和优化设计,可大幅减少井下钻具实物制造成本,缩短研发时间的效果,提高研发效率。

## 参考文献

- [1] 胡永建,孙成芹,孙琦,等. 基于 APS 传感器网络的随钻工程参数测量,电子测量技术,2018,9,41(17): 80-81.  
HU Y J, SUN CH Q, SUN Q, et al. Engineering parameters measurement while drilling based on sensor network of APS, Electronic Measurement Technology, 2018,9,41(17): 80-81.
- [2] 张伟,师奕兵,卢涛. 无线随钻泥浆信号小波包去噪处理[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(1): 80-81.  
ZHANG W, SHI YB, LU T. Wavelet packet de-noising method of wireless measurement while drilling [J]. Journal of electronic measurement and Instrument, 2010, 24(1): 80-81.
- [3] 胡永建. 基于 ADIS16228 的井下振动分析仪设计[J].

- 电子测量技术, 2018, 41(5): 1-2.
- HU Y J. Downhole vibration analyzer design based on ADIS16228 [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(5): 1-2.
- [4] 董夏妮, 王成林. 基于小波变换和模式识别随钻测量系统通信信号处理方法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5): 146-147.
- DONG X N, WANG CH L. MWD system based on wavelet transformation and pattern recognition communication signal processing method and research [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(5): 146-147.
- [5] 王玉阳, 姚丽, 韦静. 基于 HFSS 的瞬变电磁法发射线圈参数的仿真分析[J]. 现代电子技术, 2013, 36(5): 157-158.
- WANG Y Y, YAO L, WEI J. Simulation and analysis of parameters of transient electromagnet transmitting coil with HFSS [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(5): 157-158.
- [6] 杨宏正, 曹军青, 王三胜, 等. 线圈磁耦合模型仿真及其应用[J]. 测试技术学报, 2016, 30(6): 471-477.
- YANG H ZH, CAO J Q, WANG S SH, et al. Simulation and applications of coil magnetic coupling model [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2016, 30(6): 471-477.
- [7] 张波, 疏许健, 黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 4-5.
- ZHANG B, SHU X J, HUANG R H. the development of inductive and resonant wireless power transfer technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 4-5.
- [8] 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.
- LI Y, ZHANG CH G, WANG ZH. Simulation research on EMC of subway slots based on HFSS [J]. The world of inverters, 2019(3): 68-69.
- [9] 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.
- LIU P, ZHANG X P, KUANG S J, et al. 3D finite element model mesh division method in motor temperature field analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 173-174.
- [10] 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, 2019, 15(12): 278-279.
- WANG K, WANG MC, LI Z Z, et al. Simulation design of communication microstrip antenna based on HFSS [J]. Computer Knowledge and Technology, 2019, 4, 15(12): 278-279.
- [11] 刘红伟, 张波. 感应耦合与谐振耦合无线电能传输的比较研究[J]. 电气技术, 2015(6): 7-8.
- LIU H W, ZHANG B. Comparative studies between inductive coupling and resonant coupling wireless power transmission [J]. Electrical Engineering, 2015(6): 7-8.
- [12] 杨理践, 耿浩, 高松巍, 等. 高速漏磁检测饱和场建立过程及影响因素研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 55-56.
- YANG L J, GENG H, GAO S W. Study on the establishment process and influence factors of high-speed magnetic flux leakage testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 55-56.
- [13] 刘璐, 郝鹏, 刘维亨. 基于 HFSS 和无线充电的线圈天线设计[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(2): 111-112.
- LIU L, HAO P, LIU W T. Design of coil antenna based on HFSS and wireless charging [J]. Ship science and technology, 2018, 40(2): 111-112.
- [14] 白雪婧, 胡加杨, 李龙飞, 等. MEMS 微波功率传感器等效电路模型的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 153-154.
- BAI X J, HU J Y, LI L F, et al. Research on the equivalent circuit model of MEMS microwave power sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 153-154.
- [15] 张钰林, 景博, 盛增津. 改进型 MGM(1, n) 模型的焊点失效事前预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10): 53-54.
- ZHANG YL, JIN B, SHENG ZJ. Research on failure prediction of solder joints based on modified MGM(1, n) model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10): 53-54.

## 作者简介



孙成芹, 2001 年于东北石油大学获得学士学位, 2007 年于中国石油大学(北京)获得硕士学位, 现为中石油工程技术研究院北京石油机械有限公司高级工程师, 主要研究方向为仪器与测试技术、仿真与计算等。

E-mail: sunchengqin@sohu.com

**Sun Chengqin** received her B. Sc. degree from Northeast Petroleum University in 2001, M. Sc. degree from China University of Petroleum (Beijing) in 2007. Now she is a senior engineer in Beijing Petroleum Machinery Company CPET. Her main research interest includes instrument and test technology, simulation and compute, and so on.