

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005225

基于 HFSS 仿真的感应耦合传输装置设计*

孙成芹 胡永建 李显义 孙琦 唐昱哲 张冠杰

(北京石油机械有限公司技术中心 北京 102206)

摘要: 钻井油基钻井液环境下电信号传输困难是当前研究热点之一。针对此难题,设计高频感应耦合传输装置予以解决,其核心传输部件为感应耦合传输线圈。通过建立高频结构仿真(HFSS)仿真模型及实验室实物模型测试,设计出一种感应磁耦合传输线圈结构,解决井下复杂钻具感应耦合传输问题。仿真模型通过建立多线圈传输模型,研究不同圈数在不同介质条件下感应传输特性规律,据此规律设计了相应的实物模型。该实物模型同比放大10倍后即为实际钻杆传输装置,实测结果表明,实物传输装置与仿真模型传输特性一致性好,传输增益高,在模拟水基钻井液和油基钻井液情况下均可获得-20 dB以上的增益,采用常规调制解调电路可实现信号传输及处理,具备多种介质下感应传输条件。因此,该装置为复杂钻具感应传输及多种介质情况随钻测量信号传输奠定了基础,对于工程应用具有重要意义。

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 inductive coupling transmission device based on HFSS simulation

Sun Chengqin Hu Yongjian Li Xianyi Sun Qi Tang Yuzhe Zhang Guanjie

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

Abstract: Electric signal transmission in the drilling oil-based drilling fluid environment is one of the current research hotspots. To solve this problem, a high-frequency inductive coupling transmission device is designed to solve the problem. The core transmission part is an inductive coupling transmission coil. In this paper, through high frequency structure simulator (HFSS) simulation and laboratory model testing, an inductive magnetic coupling transmission coil structure is designed, which can be used to solve the problem of inductive coupling transmission of complex drilling tools downhole. The simulation model establishes a multi-coil transmission model to study the law of induction transmission characteristics of different turns in different media conditions. Based on this law, a corresponding physical model is designed. The results of actual measurement show that the transmission gain effect is good. High gain (-20 dB) is obtained both in simulating water-based drilling fluid and the case of oil-based drilling fluids, and conventional modulation and demodulation circuits can be used to realize signal transmission and processing, and have conditions for inductive transmission in a variety of media. Therefore, the device lays a foundation for the complex drilling tool induction transmission and the measurement while drilling signal transmission in a variety of media conditions, which is of great significance for engineering applications.

Keywords: HFSS simulation; inductive coupling; signal transmission

0 引言

当前,井下随钻测量数据量越来越多,有线传输以高速、宽带、稳定的传输速度具有绝对优势。但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。同时,非常规井如页岩气及长水平井由于水平段长、油气储存于裂缝中,需要采用压裂工艺等原因,容易造成井壁垮塌事故,常常使用油基钻井液进行施工,可以有效保护储层、防止水化膨胀,保障钻井安全。但由于油基钻井液具有电绝缘性^[1],会阻断直流电流通路,从而使得常规随钻电磁波测量及信号传输方法失效,适用于油基钻

收稿日期:2020-10-15

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

• 32 •

井液的高速随钻测量传输装置需求缺口较大。

国内外有很多专家学者研究此类问题,大多使用有限元仿真、MAXWELL 仿真等工具, HFSS 仿真属于有限元的一种,具有三维仿真精度高、速度快等优点。国外斯伦贝谢和贝克休斯等石油公司已有油基钻井液随钻测量类的成熟产品,国内还处于研究和试验阶段。西安石油大学高建申等^[2]研究了油基泥浆下常规电成像测井仪器的应用,提出了一种新型算法解决在油基泥浆中的使用效果差的问题,但电成像是钻后测井仪,并不是随钻测量仪器,不能实现随钻油基钻井液测量。陈杰等^[3]研制了高分辨率随钻成像测井仪,张卫等^[1]研究了随钻成像测井方法,主要研究的是成像测量原理,其原理设计中并没有针对钻井工具信号传输的问题。

高频磁耦合传输具有不限制相对位置的传输特性,即在井下钻具的部件进行相对旋转运动中也能实现信号传输。另外,感应磁耦合传输采用的是钻杆本体的有线传输复合短距离感应磁耦合传输,本质上是磁耦合传输和有线传输联合应用,因此并不受井筒钻井液性质的限制,可解决多种钻井液环境下信号传输的难题。

本文创新采用感应耦合原理,通过研究随钻测量井下工具结构,设计 HFSS(high frequency structure simulator) 仿真三维模型,根据仿真模型信号传输特性计算结果,由于实物实测结果与仿真结果具有高度一致性,可通过仿真得出实物线圈设计具体参数,据此制作实际钻具可用的感应传输装置,实现油基钻井液下信号传输,可大幅节约研发实物成本和研发时间,提高效率。

1 原理结构设计

1.1 系统结构

通用的感应耦合通信系统结构主要包括信号调制解调器、放大器、发射接收线圈等,具体结构如图 1 所示。

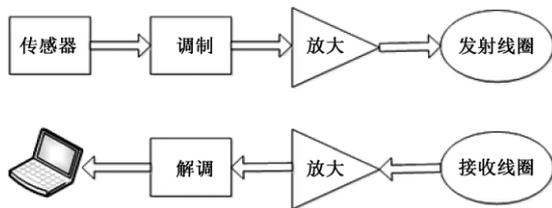


图 1 通用的磁耦合通信系统结构^[4]

钻井工程中钻柱上感应线圈的磁耦合感应传输和常规系统原理相同,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。根据井下工具结构及钻井过程井眼内部情况,井下工具内部感应耦合传输结构如图 2 所示,万向轴是相对钻头旋转的部件,传动轴是与钻头相对静止的部件,感应耦合线圈用于万向轴和传动轴之间的动静连接部分,实现信号感应耦合无线传输。

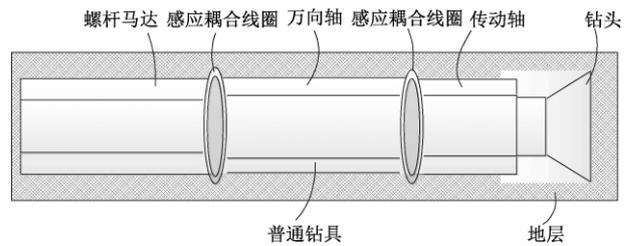


图 2 井下工具感应传输

1.2 感应耦合传输原理

感应耦合传输是通过感应耦合线圈来实现的,耦合线圈是一种感应接头,它允许能量通过一个紧凑的单元传输。感应接头的等效电路模型对于优化信号的传输效率和选择合适的信号传输方式非常重要^[5]。

常用的感应耦合方式可分为感应式和谐振式两种^[6],是电磁感应技术的两种不同的表现形式。感应耦合电路模型结构如图 3 所示,谐振式电路模型结构如图 4 所示。由于谐振式结构实现较为复杂,因此采用感应耦合方式进行进一步仿真设计。

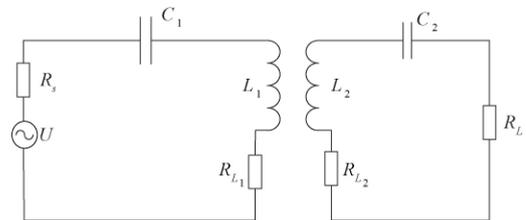


图 3 感应耦合电路模型^[6]

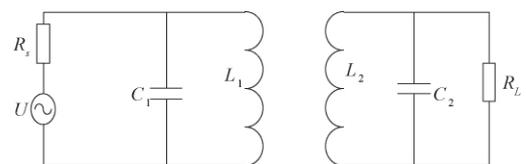


图 4 谐振式电路模型^[6]

2 仿真设计及结论

HFSS 软件是 Ansoft 公司推出的三维电磁仿真软件,是高频结构设计的首选工具,能计算任意形状的三维无源结构的 S 参数和全波电磁场,具有仿真精度高,仿真速度快,可靠性高等特点。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,主要设计难点在于端口激励方式、扫描频率选择、有限元 FEM 自适应网格剖分参数设计^[7]、迭代参数设计等^[8-9]。尤其是端口激励方式最为关键,常用的端口激励有两种方式,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^[10]。

2.1 验证不同圈数传输效果

仿真模型主要设计思路为通过设计与实际钻井井筒结

构类似的钻柱、环空和线圈模型,按照实物与模型 10 : 1 比例设计。设计难点主要在于线圈模型参数包括材质、外包裹层的厚度、圈数、螺距、线径、线圈直径等多种,如何选择参数的组合才会具有最佳传输效率。经过前期大量试验,发现圈数与介质材料的影响最大,因此,选择线圈圈数分别为 1、3 和 10 圈作为典型情况加以对比,观察 S_{21} 参数变化。线圈周围使用充满介质的立方体介质腔体模拟实际井筒环境,采用纯水、盐水和真空,水和盐水代表不同配方水基钻井液,真空绝缘性能最佳,用于代表油基钻井液,中心钻柱结构采用金属材料圆柱体,模拟实际应用中的井下普通钢制钻杆及钻具^[11-13]。由于本文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,模型结构如图 5 和 6 所示。

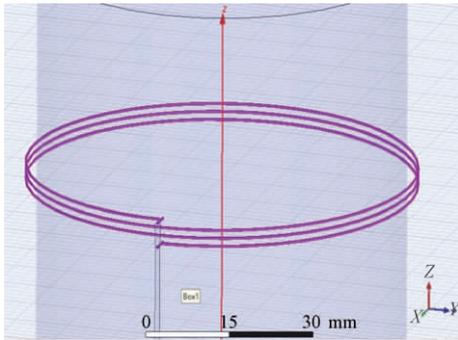


图 5 感应传输 3 圈模型

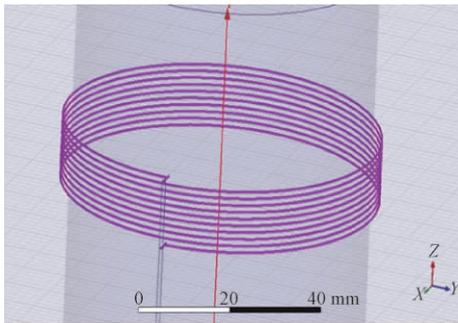


图 6 感应传输 10 圈模型

线圈漆包线线径为 0.4 mm,螺距为 1.2 mm,选用 1、3、10 圈,对比不同线圈圈数情况下的衰减性能。不同圈数仿真结果如图 7 所示,发现 S_{21} 呈规律性变化,同等参数情况下,随着圈数增加,传输增益显著提高,但线圈圈数越多内阻越大,降低了传输衰减,单纯比较圈数可表现为线性。

2.2 验证不同介质传输效果

井眼环空的介质的导电特性对感应传输具有较大影响^[14]。真空介质具有最佳的电绝缘性,可用于模拟油基钻井液或空气钻井情况,盐水成分接近于水基钻井液^[14-15],仿真模型实际模拟结果如图 8 所示,真空介质条件下衰减最大,盐水介质条件下衰减最小,纯水介质条件介于两者之间。

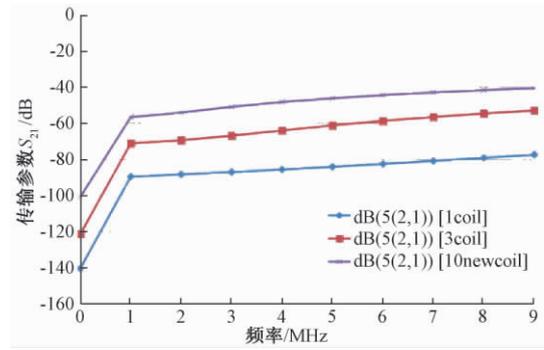


图 7 不同圈数线圈对比

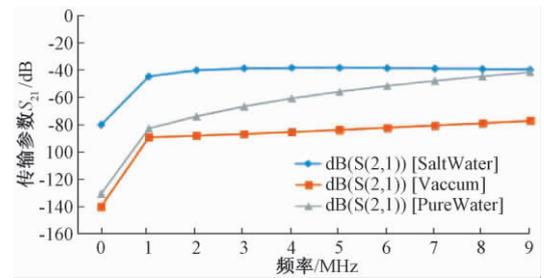


图 8 单圈模型的不同介质中的变化规律

3 实物模型设计与测试

根据模型仿真结果,制作与仿真模型同比例同参数的感应耦合传输装置,圈数分别为 50、100、150、200 圈的实物小线圈模型测试,钻柱采用一个长度为 1 m,直径 48 mm 的金属管来模拟,激励电压为 10 V,线圈采用漆包线绕制而成,直径 0.4 mm,测量频响结果如图 9~11 所示。从图 9 中可看出,在空气中增益最小,但当漆包线 200 圈也可达到 0.1 以上。从图 10 中可看出,在盐水中增益最大,当漆包线圈数为 200 时最大增益可达 0.5。图 11 所示为纯水中增益结果,当漆包线圈数为 200 时可达 0.2 以上。对于常规设计的采集电路,增益为 0.1~0.2(-20~-14 dB)以上即可用于采集,因此,线圈圈数为 50~200 均具有实际应用价值。

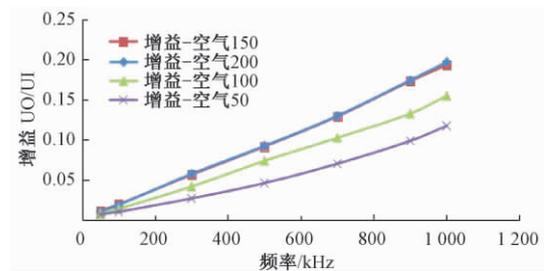


图 9 不同圈数实物模型在空气中测试结果

根据上述小模型结论,使用常规尺寸钻杆与线圈装置模拟真实井下传输情况,即将小尺寸线圈模型实物同比放大 10 倍,在空气中的测试结果如图 12 所示,信号传输增

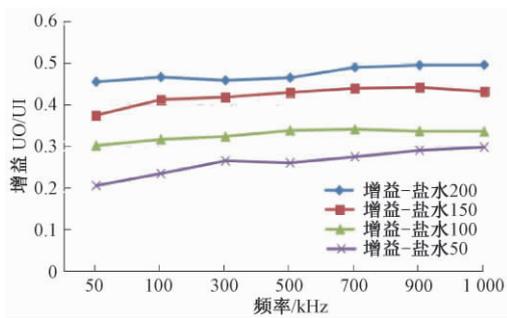


图 10 不同圈数实物模型在盐水中测试结果

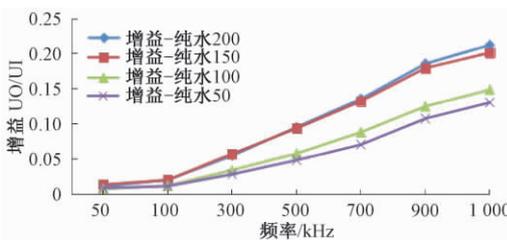


图 11 不同圈数实物模型在纯水中测试结果

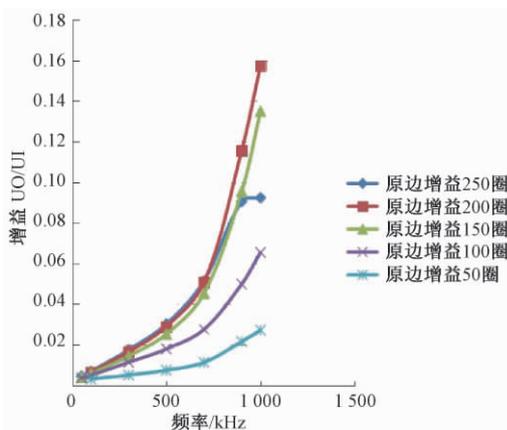


图 12 大尺寸模型不同圈数测试结果

益与上述模型完全一致,具有实用价值。

实物测试结果表明,当线圈圈数为 150 和 200 圈时,正常尺寸的实物和模型特性具有一致性,即同比放大 10 倍后特性一致,信号传输效果最佳,可以达到 0.1(换算为分贝 -20 dB)以上的高增益,能够使用常规电路进行信号采集与处理。空气和盐水中虽有一定差异,但盐水导电性能会明显优于空气介质,线圈增益可以满足电路数据采集设计需求。因此,可以判定油基钻井液情况下可实现信号传输。

4 结 论

本文通过建立 HFSS 模型和实物模型对照,开展仿真与实测相结合的研究方案,可以得出无线传输线圈装置设计结论如下:

1) HFSS 仿真具有精度高、与实物模型一致性高的优点,可作为实物设计参数选择依据;

2) 该感应传输装置线圈数为 50~200 均具有实际应用价值,线圈圈数越多,增益越大,在不同介质条件下规律一致,即可用于水基和油基钻井液多种条件;

3) 该装置可用于短距离内的动静结合装置无线传输信号,长距离(10 m 以上)有待验证;

4) 仿真参数同比放大模型可得到实物设计依据,有助于降低制造成本,提高研发效率;

5) 在此研究工作基础上,还需要完善信号采集电路设计及实际应用测试等工作,进一步证明该装置的实用效果。

参考文献

- [1] 张卫,路保平,王保良,等.适用于钻井液的油基钻井液的随钻成像电阻率成像测井方法[J].石油钻探技术,2019,47(1):112-117.
- [2] 高建申,宋阳,刘彦萍,等.低电阻率地层基于凹陷电极对的油基泥浆电成像测井四参数计算方法[J].石油学报,2020,41(8):960-968.
- [3] 陈杰,迟秀荣.油基泥浆中新型高分辨率随钻声、电成像测井仪[J].国外测井技术,2018,39(6):12-19.
- [4] 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.
- [5] 刘红伟,张波,黄润鸿,等.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):7-13.
- [6] 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.
- [7] 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):173-178.
- [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):67-69.
- [9] 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):157-160.
- [10] 李明洋,刘敏.HFSS 电磁仿真设计从入门到精通[M].北京:人民邮电出版社,2013:96-98.
- [11] 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):278-280.
- [12] 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):53-58.
- [13] 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):3-17.
- [14] 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(2):111-114.
- [15] 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):153-159.

作者简介

孙成芹,硕士,高级工程师,主要研究方向为井下随钻仪器测试、算法与仿真等。

E-mail:sunchengqin88@126.com