Vol. 37 No. 6 Dec. 2013

文章编号:1673-5005(2013)06-0172-05

doi:10.3969/j. issn. 1673-5005. 2013. 06. 028

智能钻杆磁感应传输技术及其信道特性分析

孙浩玉1,2

(1. 中国石油大学机电工程学院,山东青岛 266580; 2. 胜利石油管理局钻井工艺研究院,山东东营 257017)

摘要:分析感应耦合原理并制作耦合器,将仿真与实测相结合,在高频变压器模型基础上建立单个耦合器的准确电路模型。然后对多节耦合器连接的电路特性进行分析,得到每增加一个耦合器就增加了一个谐振回路的规律,进而得到磁感应传输信道的电路模型。针对多级信号传输的衰减问题,采用电容补偿的方法,增加谐振频率点的幅值以提高信号传输效率。最后,建立用于随钻信息磁感应传输的实验系统,验证磁感应信道电路模型的有效性。选取模型中的两个谐振点作为通信频点,在20节的传输系统中实现了115.2 kbit/s 的通信速率。

关键词:智能钻杆;感应耦合器;磁感应传输;高频变压器模型;电路模型;电容补偿

中图分类号:TE 242 文献标志码:A

Technology of magnetic induction transmission of intelligent drill pipe and its channel characteristics

SUN Hao-yu^{1,2}

- (1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
- 2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257017, China)

Abstract: Based on a high frequency transformer model, an accurate circuit model of inductive coupler was established by combining theoretical analysis on the magnetic inductive coupling principle and coupler simulations. The analysis results of the characteristics of multiple couplers connection show that adding a coupler would result in increase of a resonant circuit, therefore a circuit model of the magnetic inductive transmission channel was obtained. To solve the problem of attenuation in the multisection signal transmission, capacitance compensation was adopted to increase the amplitude of the resonant frequency, thus to improve the efficiency of the signal transmission. To verify the circuit model of the magnetic induction channel, an experiment of the data transmission with drilling was carried out. By selecting two resonance frequencies in the model as communication frequency, a 115.2 kbit/s communication rate in section 20 of the transmission system is achieved.

Key words: intelligent drill pipe; inductive coupler; magnetic induction transmission; high frequency transformer model; circuit model; capacitance compensation

目前,国内随钻信息的实时传输主要通过钻井液脉冲方式,其理想传输速率仅为2~5 bit/s,远远不能满足众多参数随钻实时快速传输要求。美国IntelliServ公司生产出一种基于电磁感应耦合原理的高速随钻数据传输系统,利用钻杆接头处的耦合线圈来实现信号的非接触式传输,数据沿着钻杆内的信号线经过耦合器沿钻杆逐级进行传输,也称为磁感应传输系统[1-2]。该系统传输的最高实验速率

可达 2 Mbit/s、应用速率为 56 kbit/s,无中继传输可达 20~30 节钻杆,既解决了电磁波、钻井液脉冲等技术速率低的问题,又克服了有线传输中磨损的缺点,被誉为近 25 年来钻井技术最重大的进步之一。目前,磁感应耦合传输技术的具体实现细节还没有相关报道。笔者通过大量的实验进行初步探索,研制出磁感应传输的模拟实验系统,对该传输技术及其信道的频率特性进行分析与讨论。

收稿日期:2013-03-20

基金项目:国家"863"计划资助课题(2007AA06Z228)

作者简介:孙浩玉(1978-),男,工程师,博士研究生,主要从事石油钻井机械和仪器装备研究。E-mail;sunhaoyu7909@163.com。

1 信号的感应耦合传输原理

磁感应耦合原理见图 1,两个相互靠近的 N 匝线圈 1 和 2,分别称为初级线圈和次级线圈,两个线圈的电感量都为 L,初级线圈的电流 i_1 将产生磁通 Φ_{11} ,其穿过次级线圈的部分称之为耦合磁通 Φ_{21} ,未穿过次级线圈的部分称为漏磁通 Φ_{1n} ,两线圈之间磁通相互匝链的关系称为磁耦合,定义耦合系数 $k = \Phi_{21}/\Phi_{11}$,表征两个线圈耦合的强弱程度。

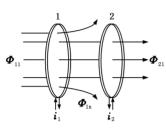


图 1 感应耦合传输原理

Fig. 1 Principle of inductively coupled transmission

由电磁感应定律表可知,耦合磁通 Φ_{21} 的变化将会引起线圈 2 感应电势的变化,其大小如下:

$$e = -\mathrm{d} \Phi_{21}/\mathrm{d} t = -M\mathrm{d} i_1/\mathrm{d} t$$
. (1) 式中, M 为两个线圈之间互感的大小, $M = kL$, k 为耦合系数。通过线圈间的电磁感能够使能量或信号由一个线圈传递到另一个线圈中 $[^{34}]$,这就是感应耦合传输的原理。由于线圈间间隙的存在必然会产生漏磁通 Φ_{1n} ,信号或能量在传输时就会发生损耗,因此要提高传输效率就必须采取措施减小漏磁通。该系统采用磁芯聚拢磁力线来提高耦合系数 k 。

实际磁感应耦合系统中,用铁氧体材料制成环状磁芯,线圈环绕在环状磁芯的槽内并进行密封制成耦合器。耦合器两端分别装入钻杆公接头的前端和母接头的台肩处(钻杆接头处要经过特殊加工),钻杆连接后耦合器两端的线圈并无直接连接,间距在1~2 mm,钻杆的对接示意图参见图2。耦合线圈1、耦合线圈2分别对应图1中的两个线圈,电缆用于

连杆的构路对后线接两线成钻接两圈回杆以个距

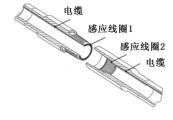


图 2 钻杆对接示意图

线圈距 Fig. 2 Diagram of drill pipe connections 离很近,即可实现磁感应耦合信号传输。

2 感应耦合器的频率特性

根据高频变压器原理^[5],提出感应耦合器电路模型如图 3 中虚线框内部所示。图 3 中,电阻 R 表示线圈的直流损耗, R_m 表示磁芯在高频下的磁滞损耗和涡流损耗,电容 C_s 是线圈的分布电容, C_p 是变压器两线圈之间的杂散电容,L 为感应耦合器的初级线圈和次级线圈的自感,M 为互感。

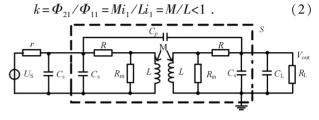


图 3 感应耦合器的电路模型

Fig. 3 Circuit model of inductive couple

通过实验验证,该电路模型在计算谐振频率时不能采用耦合器单边的电感 L,而是必须通过互感 M 来计算,这和间隙较大如能量耦合谐振频率的计算只采用单边的电感和电容 $^{[67]}$ 是完全不同的,因此该模型只适用于小间隙的信号耦合传输。

模型的参数计算过程十分繁琐,不同的线圈结构以及磁芯材料其结果都不相同。采用 LCR 测试仪进行测量: 电感可直接测量, 互感采用串联法测量; 将输入和输出端同时短接, 测量两个同名端可得分布杂散电容 C_s 的测量采用外加并联电容谐振法 S_s 6 的测量采用外加并联电容谐振法 S_s 6 的测量采用外加并联电容谐振法 S_s 6 的测量采用外加并重容谐振法 S_s 6 的测量采用外加并重容谐振法 S_s 6 的测量采用外加并重力,只能通过实测和仿真对比得到大致的取值范围。上述的电容和电感值在不同频率下的测量值会有较大差别,因此要进行分段测量,如在 S_s 1 ~ 3 MHz 的频段内,电感 S_s S_s S

实测和仿真的电路与图 3 相同,其中: U_s 和 r 分别代表信号源及其内阻,输出电压的峰值为 2 V , R_L 和 C_L 为采样探头的等效阻抗,耦合器的传输特性实测曲线如图 4 中的实线所示。

由图 4 测试曲线可知:信号传输的谐振频点在 2.1 MHz 左右,由谐振点计算公式 $f=1/2\pi\sqrt{LC}$ 可知,改变模型中电容和电感参数可调整谐振频点,但是模型中电容参数难以控制,线圈电感的改变相对容易,如:减小耦合器的线圈匝数来减小电感值,进

而获得更高的谐振频点来提高传输速率,但电感值 减小的同时也会降低传输效率,因此电感值需兼顾 速率和效率两个方面进行折中,最终要通过实验效 果来决定。

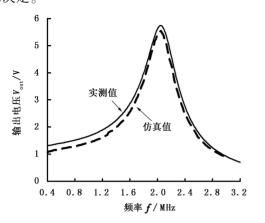
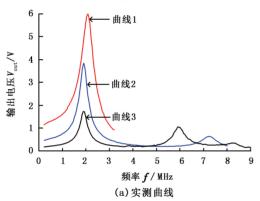


图 4 感应耦合器的频率特性

Fig. 4 Frequency characteristic of inductive couple

本文通过 Pspice 软件对耦合器的传输特性进行 仿真,并与实测结果进行比对来修正模型中的各个参



数测量值,最终的仿真曲线如图 4 中的虚线所示。

3 磁感应传输信道的电路模型

3.1 3 节感应耦合器的频率特性

首先对 3 节耦合器直接相连构成的信道进行了 实测和仿真,频率特性曲线如图 5 所示,图中的曲线 1、2 和 3 分别表示 1 节、2 节和 3 节的输出频率特性 曲线。

图 5 中的测试曲线和仿真曲线基本吻合,说明建立的耦合器电路模型及其修正后的参数测量值是正确的。从图中的曲线可以看出,每增加一个耦合器相当于增加了一个 LC 的谐振回路,因此谐振频点的数目与耦合器的个数是一致的。

此外,信号的传输效率即输出的电压幅值随耦合器的节数增加而迅速衰减,如3节耦合器后谐振幅值从6V降到了1.8V,显然信号传输的节数是有限的。为了提高信号的传输距离,必须对传输特性进行补偿。

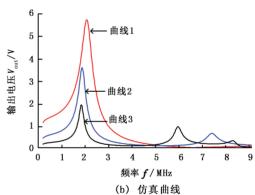


图 5 感应耦合器直连的测试曲线

Fig. 5 Test curve of inductive couple by direct connecting

3.2 磁感应耦合的补偿方法

针对磁感应耦合传输的衰减特性,可以采用电容或电感来进行补偿,其中电容补偿是一种简单易行的方式。

3.2.1 并联电容补偿

在图 3 所示的耦合器线圈回路中并联了一个 100 pF 的电容,测试结果参见图 6。

由图 6 可见,在感应耦合器的线圈上并联一个电容后,以 3 节信道为例,电路的主谐振峰值由图 5 的 6 V增大到图 6 的 10 V,显著提高了信号的传输效率,同时信号传输的谐振频点由 1.95 MHz 降到了 1.27 MHz。此时信道的频带约为 1~3 MHz,而频率小于 1 MHz 的信号则衰减很大。

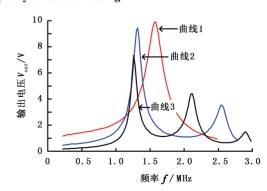


图 6 并联补偿电容的频率特性

Fig. 6 Frequency characteristic of parallel capacitance compensation

3.2.2 串联电容补偿

同理,对磁感应耦合回路串联了1 nF 的电容,

串联电容补偿的实际测试曲线参见图 7。

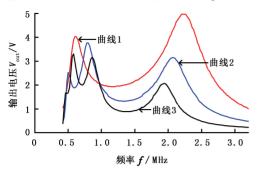


图 7 串联补偿电容的频率特性 Fig. 7 Frequency characteristic of series capacitance compensation

图 7 中的曲线表明,在每个感应耦合器的线圈上串联一个电容后,以 3 节信道为例,在 1.95 MHz 频率处还是一个谐振点,但其幅值没有得到补偿,其余两个谐振点分别转移到了 0.62 和 0.85 MHz 频率处,且幅值从 1.8 V 升高到 3 V 多。

3.2.3 串并联电容补偿

在耦合器的线圈上同时并联和串联了电容,并进行了测试,如图 8 所示。对比图 5 可以看出,以 3 节信道为例,主谐振点从 1.95 MHz 降低到 1.4 MHz,但输出幅值从 1.8 V增加到 5.8 V。因此,串、并联电容同时对信道的幅频特性起到了补偿作用,线圈上的并联电容对 1 MHz 以上谐振点的幅值进行了补偿,在线路上的串联电容相当于增加了谐振支路,其谐振频点分布在 1 MHz 以下。

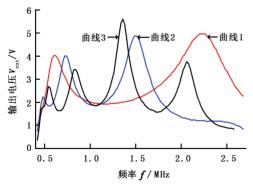


图 8 电容补偿后的频率特性
Fig. 8 Frequency characteristic of capacitance

compensation

由此,最终得到的磁感应传输信道电路模型如图 9 所示,其中 C_q 和 C_l 分别为补偿的串联和并联电容,用于连接耦合器的 10 m 信号传输线的损耗可忽略不计。要通过该模型准确获取实际特性曲线的前提是耦合器的参数值必须准确,此外输入和输出(测试)端的等效阻抗尤其是电容值也必须准确,否

则也会极大影响测试和仿真的一致性。

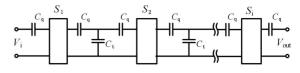


图 9 磁感应传输信道电路模型

Fig. 9 Circuit model of magnetic inductive transmission channel

3.3 信道频率特性实验

对 10 节标准钻杆进行再加工并安装了 9 对耦合器后放入钻井实验平台,每节钻杆内的信号线用套管密封,补偿用的串、并联电容密封在耦合器线圈和信号线接头处,封装后的单边耦合器(分别安装在公、母接头)以及实验平台的照片如图 10 所示,钻井实验平台的测试参见图 11。



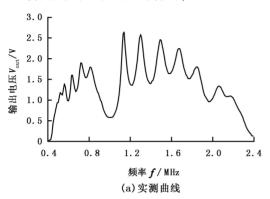
图 10 封装后的耦合器 Fig. 10 Packaged coupler



图 11 钻井实验平台 Fig. 11 Experimental platform for drilling

在井口发送信号,信号经过10节钻杆信号线和9对耦合器后从井下直连出井口用于测试,其输出的电压频域特性如图12(a)中曲线所示,仿真用的电路模型如图9所示,仿真曲线如图12(b)中曲线所示。

由图中曲线可知,在 1.1~1.5 MHz 间的几个谐振频点的幅值衰减最小,用其作为载波模拟频率则信号的传输效率会最高。实测和仿真曲线相比,丢掉了几个谐振点而且幅值上也有些差异,一个原因是由参数不可能完全统一造成的;另外,从仿真曲线上也可看出,谐振回路的增多,使有的谐振点非常不明显,也会造成在实测扫频时的遗漏。但从总体上看,实测和仿真曲线基本上是吻合的,因此可以通



过建立的电路模型来分析实际信道的频率特性。

信号通信实验是采用频移键控(frequency shift keying-FSK)方式,在1.1~1.5 MHz 间选取了两个谐振点作为调频的频点,通信的数字速率最高可达115.2 kbit/s。由于再加工的钻杆数量原因而没能进行更多节的实际传输实验,但在进行模拟实验时信号传输可超过20节。

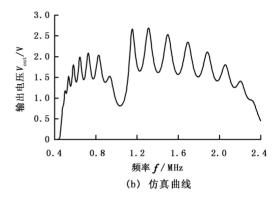


图 12 磁感应传输信道的频率特性

Fig. 12 Frequency characteristic of magnetic inductive transmission channel

4 结 论

- (1)基于磁感应传输原理制作了耦合器,实现 了信号在钻杆间的非接触传输,在高频变压模型的 基础上建立了耦合器的电路模型,通过仿真与实测 的相结合.对模型中的测量参数进行了修正。
- (2)分析了多节耦合器连接时的信号传输特性,得到了每增加一个耦合器就增加一个谐振回路的规律,进而得到了连续磁感应传输信道的电路模型。采用电容补偿的方法,增加了谐振频点的幅值,提高了信号传输效率,但是降低了信号频带且牺牲了信号的传输速率。
- (3)搭建了磁感应传输系统,验证了连续磁感应传输技术的可行性,为该技术的进一步研究奠定了基础。
- (4)国外技术在数字速率上已达到 2 Mbit/s,超过了课题组用的模拟载波速率,相比之下技术差距非常明显,因此在耦合器的结构、磁芯、线圈以及补偿等最基本的环节上还需要大量的研究与探索。

参考文献:

[1] MICHAEL J J, DAVID R H, DARREL C H, et al. Telemetry drill pipe: enabling technology for the downhole internet [R]. SPE 79885, 2003:1-10.

- [2] DAVID R H, JOE F, WILDE T J, et al. Transmitting data through a downhole environment: US,7298287 B2 [P]. 2007-11-20.
- [3] KLONTZ K W, DIVAN D M. Contactless power delivery system for mining applications[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1995,31(1):27-35.
- [4] MAYORDOMO I, DRAGER T, SPIES P, et al. An overview of technical challenges and advances of inductive wireless power transmission [J]. Proceedings of the IEEE, 2013,101(6):1302-1311.
- [5] 林宁,姚缨英,李玉玲,等. 感应耦合电能传输系统的设计[J]. 浙江大学学报:工学版,2012,46(2):199-205.
 - LIN Ning, YAO Ying-ying, LI Yu-ling, et al. Design of inductively coupled energy transfer system[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46 (2):199-205.
- [6] 夏晨阳,孙跃,贾娜,等. 耦合磁共振电能传输系统 磁路机构参数优化[J]. 电工技术学报, 2012, 27 (11):139-145.
 - XIA Chen-yang, SUN Yue, JIA Na, et al. Magnetic circuit parameter optimization for coupled magnetic resonances power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(11):139-145.

(下转第183页)

- [4] MALLADI R, SETHIAN J A, VEMURI B C. Shape modeling with front propagation: a level set approach [J]. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995,17(2):158-175.
- [5] CASELLES V, KIMMEL R, SAPIRO G. Geodesic active contours [J]. International Journal of Computer Vision, 1997,22(1):61-79.
- [6] SADDIQI K, LAUZIERE Y B, TANNENBAUM A, et al. Area and length minimizing flows for shape segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998,7(3):433-443.
- [7] XU C, YEZZI A, PRINCE J L. On the relationship between parametric and geometric active contours [C]//34th Asilomar Conference of Signals, Systems, and Computers, 2000.
- [8] MUMFORD D, SHAH J. Optimal approximation by piecewise smooth functions and associated variational problems
 [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics,
 1989,42;577-685.
- [9] CHAN T, VESE L. Active contour without edges for vector-valued image [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001,10(2):266-277.
- [10] STERNBERG S R. Grayscale morphology[J]. Computer Vision Graphics, and Image Process, 1986,35(3):333-

355.

- [11] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology [M]. Vol. II: Theoretical Advances, Chap. 10. London: Academic Press, 1988.
- [12] KAELI J W, SINGH H, ARMSTRONG R A. An automated morphological image processing based methodology for quantifying coral cover in deeper-reef zones [C/OL]// 2006 IEEE/MTS Oceans Conference, Boston, USA, September 18-21, 2006 [2013-02-10]. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp? tp = &arnumber = 4098975.
- [13] 吴国良,杨浩,罗建.二维 A Tuous 算法图像边缘检测研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(11):167-169.

 WU Guo-liang, YANG Hao, LUO Jian. Research of edge detection based on 2-D A Tuous algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2010,46(11): 167-169.
- [14] 蒋欣. 水平集方法及其在图像分割上的应用[J]. 上海生物医学工程, 2004,25(3):29-32,61.

 JIANG Xin. Level set method and its application on image segmentation[J]. Shanghai Journal of Biomedical Engineering, 2004, 25(3):29-32,61.

(编辑 修荣荣)

(上接第176页)

- [7] 孙跃,夏晨阳,戴欣,等. 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化[J]. 中国电机工程学报,2010,30(33):44-50.
 SUN Yue, XIA Chen-yang, DAI Xin, et al. Analysis and optimization of mutual inductance for inductively coupled power transfer system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012,27(11):139-145.
- [8] 李维波,毛承雄,陆继明,等.分布电容对 Rogowski 线圈动态特性影响研究[J]. 电工技术学报,2004,19 (6):12-17.

- LI Wei-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming et al. Study of the influence of the distributed capacitance on dynamic property of rogowski coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(11):139-145.
- [9] 彭勃. 回转器-电容模型中变压器寄生参数的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学自动化学院, 2008. PENG Bo. The research of transformer's stray parameters in gyrator-capacitor model [D]. Nanjing: College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

(编辑 修荣荣)