2021 年 第21卷 第35期
2021, 21(35): 15012-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:贾 甲, 苏义脑, 沈 跃, 等. 电遥测钻柱信号传输的建模分析与信道特性改善[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15012-15018.

Jia Jia, Su Yinao, Shen Yue, et al. Modeling analysis and channel characteristics improvement of the telemetry drill string signal transmission [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15012-15018.

电遥测钻柱信号传输的建模分析与信道特性改善

贾 甲[1], 苏义脑[1,2*], 沈 跃[3], 王 龙[3], 张令坦[3], 盛利民[2]

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580; 2. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206;
3. 中国石油大学(华东)理学院, 青岛 266580)

摘 要 电遥测钻柱信息遥测系统由多节布线钻杆级联形成,用于井下随钻测量数据的高速率上传。由于信道传输的高频电压信号衰减严重,目前每隔约300 m需要中继器进行信号续传,因此如何延长中继距离成为系统性能改善的关键。布线钻杆由布有同轴电缆的杆体及电磁耦合器构成,高频下布线杆体的同轴电缆可看作传输线,电磁耦合器可等效为高频变压器,将二者结合建立了布线钻杆的等效电路模型及电遥测钻柱信道的电压传输函数数学模型;通过外置补偿元件使传输线达到阻抗匹配以确立布线钻杆的电磁参数;通过改变补偿元件参数在传输线终端产生反射电压来加强传输线上的信号幅度,使信道的信号传输能力得到有效改善。研究表明,适当增大补偿元件电阻值可以大幅度提高信道的电压传输函数值,在目前信道带宽及信号检测灵敏度条件下中继距离可提高1倍,达到大幅度延长中继距离的目的。研究可以为布线钻杆的电磁设计及电遥测钻柱信息传输系统的性能改进提供理论指导。

关键词 随钻测量; 电遥测钻柱; 布线钻杆; 电磁耦合器; 信号传输; 反射电压

中图法分类号 TE927; **文献标志码** A

Modeling Analysis and Channel Characteristics Improvement of the Telemetry Drill String Signal Transmission

JIA Jia[1], SU Yi-nao[1,2*], SHEN Yue[3], WANG Long[3], ZHANG Ling-tan[3], SHENG Li-min[2]

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing 102206, China;
3. College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

[**Abstract**] The telemetry drill string is formed by a string of wired drill pipes, it is used to upload downhole measurement while drilling (MWD) data at high speed. Due to the serious attenuation of high-frequency voltage signal in the channel, repeaters are needed for continuous transmission at every 300 meters. Thus, how to extend the relay distance is the key to improve the channel characteristics. The wired drill pipe consists of a rod body with coaxial cable and an electromagnetic coupler. The coaxial cable embedded in the rod body can be regarded as a transmission line at high frequency condition, and the electromagnetic coupler can be equivalent to high frequency transformer. Combining the transmission line and high frequency transformer, the equivalent circuit model of the wired drill pipe and the mathematical model of the voltage transfer function of the telemetry drill string channel are established. The impedance matching of transmission line is achieved by placing external compensation element to determine the electromagnetic parameters of the wired drill pipe. By changing the parameters of the compensation element, the reflected voltage is generated at the transmission line terminal to enhance the signal amplitude of the transmission line, so that the signal transmission capability of the channel is effectively improved. The research shows that the voltage transfer function of the channel can be greatly improved by appropriately increasing the resistance of the compensation element, and the relay distance can be doubled under the current channel bandwidth and signal detection sensitivity, so as to greatly extend the relay distance. This paper can provide theoretical guidance for the electromagnetic design of wired drill pipe and improve the performance of the telemetry drill string information transmission system.

[**Keywords**] measurement while drilling (MWD); telemetry drill string; wired drill pipe; electromagnetic coupler; signal transmission; reflected voltage

收稿日期: 2021-04-23; **修订日期**: 2021-09-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(27R1710013A)

第一作者: 贾 甲(1991—),男,汉族,山东郓城人,博士研究生。研究方向:井下系统、信息与控制工程。E-mail:qingfengxia2010@163.com。

* **通信作者**: 苏义脑(1949—),男,汉族,河南偃师人,博士,中国工程院院士,教授。研究方向:井下系统、信息与控制工程。E-mail:suyinao@petrochina.com.cn。

随钻测量(measurement while drilling,MWD)/随钻测井(logging while drilling, LWD)技术在现代油气钻井中起重要作用,随钻测量将钻井工程参数(钻井液压力、井筒温度、井斜角、方位角、钻压、钻头扭矩、钻头震动等)及地层参数(地层电阻率、岩石孔隙度、岩石自然伽马射线等)实时测量并传输至地面,控制钻头在地层中沿规划轨道向油气储层钻进,保证钻进过程的快速、安全与高效[1]。目前常规的井下信息无线传输方式如泥浆压力脉冲[2](数据传输速率 3 ~ 20 bit/s)、地层电磁波[3](传输速率 6 bit/s 左右)、钻柱声波[4](传输速率 100 bit/s 左右)等的数据传输速率较低,严重影响地层参数的高分辨率实时获取。电遥测钻柱是一种具有高传输速率的井下数据传输系统,采用布有导线的布线钻杆级联成钻柱来传输高频电磁信号。2003 年 Grant Prideco 公司开发出基于布线钻杆的 Intelliserv network system 井下信息传输系统并进行现场测试[5],中继距离长度内信道的电压传输系数为 0.013(-18.8 dB),带宽 2 MHz,理论上数据传输速率可达 2 Mbit/s;2015 年 Grant Prideco 公司推出可靠性更高的第二代系统应用于现场,中继距离仍为 300 m,通过中继器的续传可实现分辨率地层图像数据的实时传输[6];孙浩玉[7]通过在布线钻杆的电磁耦合器输入端串并联电容以产生电压谐振来尝试改善信道的传输特性,其室内实验的数据传输速率为 115 Kbit/s,中继距离 200 m[7];胡永建等[8-9]采用电路的联合仿真研究了高频磁耦合有缆钻杆信道的传输特性并进行了现场实验,数据传输速率为 100 Kbit/s,中继距离 300 m 左右。电遥测钻柱的中继距离约 300 m,对于 3 000 m 以上常规井深的钻井过程,需配置 10 个以上中继器,而过多的中继器会造成系统制造成本的提高及信号传输可靠性的降低,如何延长中继距离成为系统性能改善的关键,但目前的相关研究在此方面均未取得实质性进展。笔者基于传输线理论和高频变压器原理建立布线钻杆的电路模型,通过杆体传输线与耦合器之间的阻抗匹配分析探索改善电遥测钻柱信道传输特性的有效方法。

1　电遥测钻柱信号传输的数学模型

1.1　布线钻杆的等效电路模型

布线钻杆的基本结构与普通钻杆相同,长度 10 m左右,均由杆体和连接端组成,但在布线钻杆的杆体内布置有同轴电缆,杆体两端的公、母接头内分别镶嵌有被磁芯包裹的线圈,线圈与同轴电缆连接组成闭合回路,当钻杆之间通过接头串联成钻柱时,相邻钻杆端部的一对线圈形成电磁耦合器来传递信号能量[10],此为电遥测钻柱的信号传输原理,图 1 为电遥测钻柱的结构示意图。

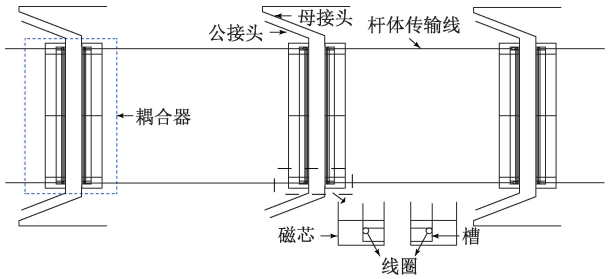

图 1　电遥测钻柱结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of telemetry drill string

当布线钻杆中的信号频率高于 1 MHz 时,杆体中的同轴电缆应看作是具有分布参数的传输线,杆体中的同轴电缆可看作传输线;相邻钻杆端部的线圈划入布线钻杆电路构成电磁耦合器,其结构类似于高频变压器,通常耦合器的磁芯断面涂覆有保护层,造成耦合线圈的磁路存在一定间隙,会产生磁场的泄漏。由于耦合器工作于高频段,其电路建模要考虑线圈的分布电容、线圈电感、磁场泄漏引起的漏电感及磁芯涡流损耗的影响。根据 NDT(nondestructive testing technology)的电磁检测原理分析[11],磁芯材料中产生的涡流会与耦合器的原、副边线圈分别作用而影响线圈电流;由于涡流环可等效为闭合的单匝线圈,存在涡流环等效电感与涡流环等效电阻,涡流环与耦合器的原、副边线圈之间均存在磁场耦合[12]。基于上述考虑,可以构建自井口开始第 i 节布线钻杆的等效电路模型见图 2。

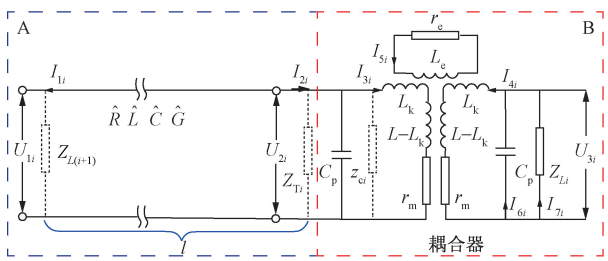

图 2　布线钻杆的等效电路模型

Fig. 2　Equivalent circuit model of wired drill pipe

图 2 中,A 部分为杆体传输线,B 部分为电磁耦合器等效电路;l 为传输线长度;$\hat{R}$、$\hat{G}$、$\hat{L}$、$\hat{C}$为传输线单位长度的电阻、电导、电感、电容;$R_c=\sqrt{\hat{L}/\hat{C}}$为传输线特性阻抗;$r_m$ 为线圈导线电阻;

L 为线圈电感;L_k 为线圈的泄漏电感;$M = kL$ 为耦合线圈之间的互感量;$k = (L - L_k)/L$ 为耦合线圈之间的耦合系数;C_p 为线圈的分布电容;L_e 为磁芯内涡流环的等效电感,由于高频电流的趋肤效应,涡流环非常接近于线圈,涡流环等效半径与线圈半径基本一致,因此有 $L_e = L$;M_e 为耦合线圈与涡流环之间的互感量,反映线圈与涡流环间的相互影响,由于线圈被磁芯包裹,线圈与涡流环之间处于完全耦合状态,因此有 $M_e = L_e = L$;r_e 为涡流环的等效电阻;U_{1i} 为第 i 节布线钻杆杆体传输线的输入电压相量;U_{2i} 为耦合器输入电压相量;U_{3i} 为耦合器输出电压相量;$\dot{I}_{5i}$ 为涡流环电流;Z_{Li} 为耦合器的负载阻抗;$Z_{Ti} = (Z_{ci}^{-1} + j\omega C_p)^{-1}$ 为耦合器的等效输入阻抗,Z_{ci} 为从原边线圈的 C_p 后部看向耦合器的输入阻抗。根据图 2 可建立第 i 节布线钻杆杆体传输线及电磁耦合器的电路方程。

杆体传输线电路方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_{1i} = \dfrac{1}{2}(\dot{U}_{2i} + Z_{Ti}\dot{I}_{2i})e^{\gamma l} + \dfrac{1}{2}(\dot{U}_{2i} - Z_{Ti}\dot{I}_{2i})e^{-\gamma l} \\ \dot{I}_{1i} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\dot{U}_{2i}}{R_c} + \dot{I}_{2i}\right)e^{\gamma l} - \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\dot{U}_{2i}}{R_c} - \dot{I}_{2i}\right)e^{-\gamma l} \\ \dot{U}_{2i} = Z_{Ti}\dot{I}_{2i} \end{cases} \tag{1}$$

耦合器电路方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_{2i} = [r_m + j\omega(L - L_k)]\dot{I}_{3i} + j\omega L_k \dot{I}_{3i} + j\omega \dot{M} I_{4i} + j\omega M_e \dot{I}_{5i} \\ (r_e + j\omega L_e)\dot{I}_{5i} + j\omega M_e(\dot{I}_{3i} - \dot{I}_{4i}) = 0 \\ Z_{Li}\dot{I}_{7i} - j\omega M_e \dot{I}_{5i} + [r_m + j\omega(L - L_k)]\dot{I}_{4i} + \\ \quad j\omega L_k \dot{I}_{4i} + j\omega \dot{M} I_{3i} = 0 \\ \dot{U}_{3i} = Z_{Li}\dot{I}_{7i} = \dfrac{\dot{I}_{6i}}{j\omega C_p} \\ \dot{I}_{4i} = \dot{I}_{6i} + \dot{I}_{7i} \end{cases} \tag{2}$$

式中:$\gamma = \sqrt{(\hat{R} + j\omega\hat{L})(\hat{G} + j\omega\hat{C})}$ 为传输线的传播常数;$\omega = 2\pi f$ 为信号角频率;f 为信号频率。

1.2 布线钻杆电磁参数的确立

1.2.1 传输线与耦合器的阻抗匹配

电路结构及参数决定电信号能否有效地传输。电遥测钻柱信道由多节布线钻杆串联形成,当杆体传输线与电磁耦合器的阻抗匹配时,传输线可以达到最大功率传输[13];基于传输线与电磁耦合器之间的阻抗匹配来确定布线钻杆的电磁参数,理论上可以获得传输线上信号功率的最佳传输。设自井口开始的第 1 节布线钻杆的耦合器负载阻抗为 $Z_{L1} = R_c$,通过在传输线与电磁耦合器原边线圈的连接端并联上由电阻 R_2 和电容 C_2 组成的阻抗补偿元件,可以使传输线达到阻抗匹配,见图 3。

1.2.2 电磁参数的数学模型

根据式(2),建立第 i 节电磁耦合器的输入阻抗函数为

$$\begin{aligned} Z_{ci}(\omega) = {} & r_m + j\omega L + \omega^2 L^2/(r_e + j\omega L) - \{(j\omega C_p Z_{Li} + 1) \times \\ & [j\omega Lk(r_e + j\omega L) - \omega^2 L^2]^2\} \Big/ \{(r_e + j\omega L)^2 Z_{Li} + \\ & [(r_m + j\omega L)(r_e + j\omega L) + \omega^2 L^2](r_e + j\omega L) \times \\ & (j\omega C_p Z_{Li} + 1)\} \end{aligned} \tag{3}$$

杆体传输线在设计频率 f_d 处阻抗匹配,此条件下各耦合器的负载阻抗均为 $Z_{Li} = R_c$,从原边线圈的 C_p 后部看向耦合器的输入阻抗为

$$\begin{aligned} Z_c = {} & r_m + j\omega_d L + \omega_d^2 L^2/(r_e + j\omega_d L) - \{(j\omega_d C_p R_c + 1) \times \\ & [j\omega_d Lk(r_e + j\omega_d L) - \omega_d^2 L^2]\}^2 \Big/ \{(r_e + j\omega_d L)^2 R_c + \\ & [(r_m + j\omega_d L)(r_e + j\omega_d L) + \omega_d^2 L^2](r_e + j\omega_d L) \times \\ & (j\omega_d C_p R_c + 1)\} \end{aligned} \tag{4}$$

传输线阻抗匹配时,其负载阻抗与传输线特性阻抗相等,即

$$\left[\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{R_2} + j\omega_d(C_2 + C_p)\right]^{-1} = R_c \tag{5}$$

将式(4)代入式(5)并进行数学分析,可以得到阻抗补偿元件中电阻与电容为

$$\begin{cases} R_2 = \dfrac{R_c |Z_c|^2}{|Z_c|^2 - R_c \mathrm{Re}(Z_c)} \\ C_2 = \dfrac{\mathrm{Im}(Z_c)}{\omega_d |Z_c|^2} - C_p \end{cases} \tag{6}$$

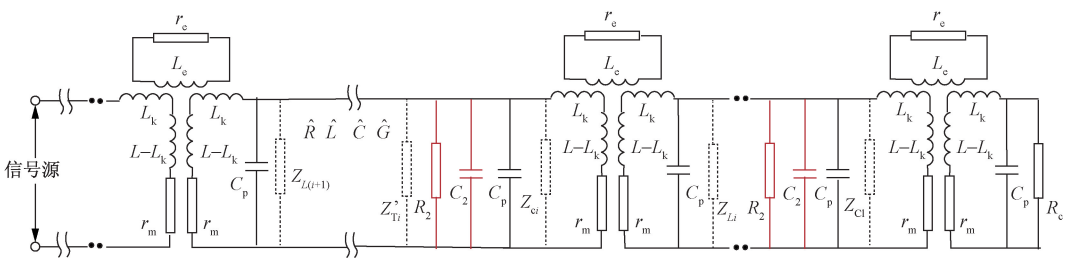

图 3 传输线与耦合器的阻抗匹配

Fig. 3 Impedance matching between transmission line andthe coupler

式(6)中:$|Z_c|$为Z_c的模;$\mathrm{Re}(Z_c)$为Z_c的实部;$\mathrm{Im}(Z_c)$为Z_c的虚部,且分布电容应满足$C_p < \frac{\mathrm{Im}(Z_c)}{\omega_d |Z_c|^2}$。

由式(6)知,当$\mathrm{Re}(Z_c) = R_c/2$时,R_2产生的功耗最小,因此可以得到耦合器的线圈电感为

$$L = \frac{\omega_d^2 C_p R_c^2 - R_c \sqrt{2\omega_d^2 k^2 - 1}}{\omega_d^4 C_p^2 R_c^2 + 1 - 2\omega_d{}^2 k^2} \tag{7}$$

根据式(7)的约束条件,耦合系数应满足$\sqrt{\frac{\omega_d^2 C_p^2 R_c^2}{2}} < k < 1$。

在给定设计频率、传输线的单位长度电容及单位长度电感等条件下,通过式(7)与式(6)可以确定耦合器的线圈电感量、耦合系数及阻抗补偿元件中的电阻值与电容值。

1.3　电遥测钻柱的电压传输函数

信道的电压传输函数与信道电磁参数、信号频率及钻杆节数有关;其中,信道电压传输函数值随频率的变化称之为信道的频率特性或信道传输特性。电遥测钻柱传输的信号为具有一定带宽的频带信号,信号频谱以载波频率为中心对称分布,信号的带宽决定信号所携带数据的传输速率,因此信道的频率特性应满足信号的频率分布特征。对于频带信号,在频率偏离设计频率的频谱处传输线与电磁耦合器是失配的,会在传输线终端产生反射电压,影响传输线的电压传输函数。

基于式(1)的杆体传输线电路方程,可以建立频率影响下第i节布线钻杆杆体传输线的电压传输函数为

$$\eta_{di}(\omega) = \left| \frac{1 + \Gamma_i}{e^{\gamma l} + \Gamma_i e^{-\gamma l}} \right| \tag{8}$$

式(8)中:$\Gamma_i = \frac{Z'_{Ti} - R_c}{Z'_{Ti} + R_c} = \left| \frac{Z'_{Ti} - R_c}{Z'_{Ti} + R_c} \right| e^{j\varphi}$为传输线的终端反射系数[14];$Z'_{Ti} = \left[\frac{1}{Z_{ci}} + \frac{1}{R_2} + j\omega(C_2 + C_p) \right]^{-1}$为传输线终端的负载阻抗。

根据式(2)的耦合器电路方程,在频率影响下,第i节电磁耦合器的电压传输函数为

$$\eta_{ci}(\omega) = \left| -\left(j\omega kL - \frac{\omega^2 L^2}{r_e + j\omega L} \right) \Big/ \left\{ r_m + j\omega L + \frac{\omega^2 L^2}{r_e + j\omega L} + [r_m + j\omega L(1+k)] \times \left[r_m + j\omega L(1-k) + \frac{\omega^2 L^2}{r_e + j\omega L} \right] \left(\frac{1}{Z_{Li}} + j\omega C_p \right) \right\} \right| \tag{9}$$

第i节钻杆的电压传输函数$\eta_i(\omega)$为对应传输线与电磁耦合器传输函数的乘积,即

$$\eta_i(\omega) = \eta_{ci}(\omega)\eta_{di}(\omega) \tag{10}$$

电遥测钻柱信道的电压传输函数为多节布线钻杆电压传输函数的阶乘,则n节钻杆串联组成的信道电压传输函数或信道传输特性表达式为

$$\eta(\omega) = \prod_{i=1}^{n} \left| -\left[\left(j\omega M - \frac{\omega^2 L^2}{r_e + j\omega L} \right) \times \frac{1 + \Gamma_i}{e^{\gamma l} + \Gamma_i e^{-\gamma l}} \right] \Big/ \left\{ r_m + j\omega L + \frac{\omega^2 L^2}{r_e + j\omega L} + [r_m + j\omega L(1+k)] \left[r_m + j\omega L(1-k) + \frac{\omega^2 L^2}{r_e + j\omega L} \right] \left(\frac{1}{Z_{Li}} + j\omega C_p \right) \right\} \right| \tag{11}$$

2　利用杆体传输线的电压反射改善信道的传输特性

电磁耦合器线作为传输线的负载,其输入阻抗会对传输线的信号传输产生较大影响。耦合器为匝数比1:1的高频变压器,由于存在磁路间隙造成较大的磁场泄漏,耦合系数为0.4~0.6[15],因此其电压传输函数值仅为零点几,如果杆体传输线的电压传输函数值为1,钻杆级联时电压传输函数值的阶乘造成信道的电压传输能力急剧降低。如果采用某种方法使传输线的电压传输函数值大于1,将在一定程度上改善电遥测钻柱的电压信号传输能力。

研究表明,传输线与电磁耦合器之间的阻抗匹配时可以做到最佳功率传输,但无法实现有效的电压信号传输,因此传输线与电磁耦合器之间的阻抗匹配只是用来确定布线钻杆的电磁参数。此外,电遥测钻柱传输的信号为具有一定带宽的频带信号,在频率偏离设计频率的频谱处传输线与电磁耦合器是失配的,在传输线终端将产生信号电压的反射;如果合理利用传输线终端的反射电压来提高杆体传输线的传输函数,可以为信道传输特性的改善提供一种有效的解决方法或途径。

传输线阻抗失配时,传输线终端的信号电压为入射信号电压与反射信号电压的矢量和,反射电压相量与入射电压相量的比值被定义为复函数的终端反射系数,其模反映了反射电压相对于入射电压的强度,幅角为反射电压与入射电压之间的夹角。通过对信号矢量进行三角几何分析,如果反射系数的辐角小于120°,则反射信号电压与入射信号电压的矢量和将加强传输线上的信号强度[16],使传输线的电压传输函数值大于1。基于以上分析,在保持

耦合器线圈电感量、耦合系数等电磁参数不变条件下,仅适当改变阻抗补偿元件的电容或电阻值使传输线在设计频率处将呈现一定的阻抗失配,即通过调节阻抗补偿元件值来控制传输线的终端反射系数以寻求获得最佳的信道传输特性。根据式(11),在频率改变情况下,如果某一频段内反射电压信号与入射电压信号之间的相位差满足小于120°的条件,则信道将呈现具有一定频带宽度的通频带且通带内具有较高电压传输函数值的频率特性,达到改善信道传输特性的目的。

3 数值计算与分析

计算条件:设计频率 $f_d = 10$ MHz;杆体长度 $l = 10$ m;传输线单位长度电阻 $\hat{R} = 0.08\ \Omega/\text{m}$;单位长度电感 $\hat{L} = 3.8 \times 10^{-7}$ H/m;单位长度电容 $\hat{C} = 6.4 \times 10^{-11}$ F/m;单位长度电导 $\hat{G} = 1.4 \times 10^{-16}$ S/m;传输线特性阻抗 $R_c = \sqrt{\hat{L}/\hat{C}} = 76.8\ \Omega$;磁芯材料为相对磁导率 $\mu_r = 10$ 的镍锌铁氧体,耦合系数 $k = 0.47$;分布电容 $C_p = 50$ pF;涡流环等效电阻 $r_e = 52.6\ \text{k}\Omega$;线圈电阻 $r_m = 8.9 \times 10^{-3}\ \Omega$;根据式(6)和式(7)计算,补偿电阻 $R_2 = 92\ \Omega$;补偿电容 $C_2 = 159$ pF;线圈电感 $L = 1.35\ \mu\text{H}$;自井口起第1节布线钻杆电磁耦合器的负载阻抗为 $R_{L1} = 76.8\ \Omega$。

3.1 阻抗匹配状态下信道的传输特性分析

布线钻杆阻抗匹配下有 $R_2 = 92\ \Omega$,$C_2 = 159$ pF,根据式(11)计算得到信道的传输特性见图4。

由图4可以看出,信道的电压传输特性存在通带,但通带内的电压传输函数值过小,10节钻杆形成的信道电压传输函数的峰值仅0.002 2,且随信道长度的增加急剧减小,说明布线钻杆在阻抗匹配状态下并不适于电压信号的传输,证实了上述分析结论。

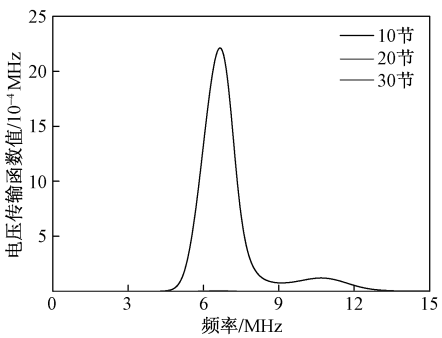

图4 布线钻杆阻抗匹配下的信道传输特性

Fig. 4 Channel transmission characteristics of wired drill pipes under impedance matching

3.2 补偿电容对信道传输特性的影响

保持补偿电阻值 $R_2 = 92\ \Omega$,调整补偿电容值使其偏离阻抗匹配时的数值,在 $C_2 = 80$ pF 及 $C_2 = 320$ pF 条件下,根据式(11)计算得到信道的传输特性曲线见图5。

从图5(a)可以看出,相对于布线钻杆在阻抗匹配状态下信道的传输特性,减小补偿电容值可以适当提高信道的电压传输函数值,但电压传输函数的峰值随信道长度的增加仍急剧减小,说明减小补偿电容值对电压信号的传输无根本性改善。从图5(b)可以看出,增大补偿电容值不但信道传输特性出现了双峰通带,而且通带内电压传输函数的峰值相对于图4还要更小,说明增大补偿电容值反而会使信道的传输特性变差。

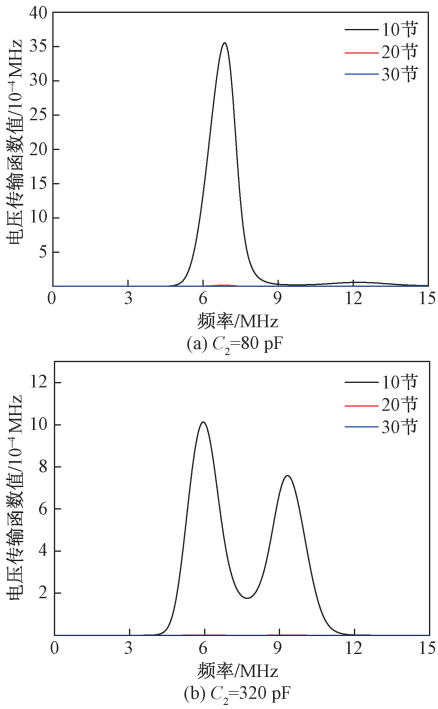

图5 补偿电容值对信道传输特性的影响

Fig. 5 Influence of the compensation capacitance on the channel transmission characteristics

3.3 补偿电阻对信道传输特性的影响

由于补偿电阻并联在传输线的终端,因此,增大补偿电阻值既可以减小电压信号在电阻上的能量损耗也可以改变传输线的匹配状态。保持补偿电容值 $C_2 = 159$ pF,调整补偿电阻值使其大于阻抗匹配时的数值,在 $R_2 = 1\ 000\ \Omega$ 及 $R_2 = 2\ 000\ \Omega$ 条件下,根据式(11)计算得到信道的传输特性曲线见图6。

从图6可以看出:

(1)信道的传输特性曲线存在两个独立通带,但第二通带较第一通带的对称性要好,且带宽要大

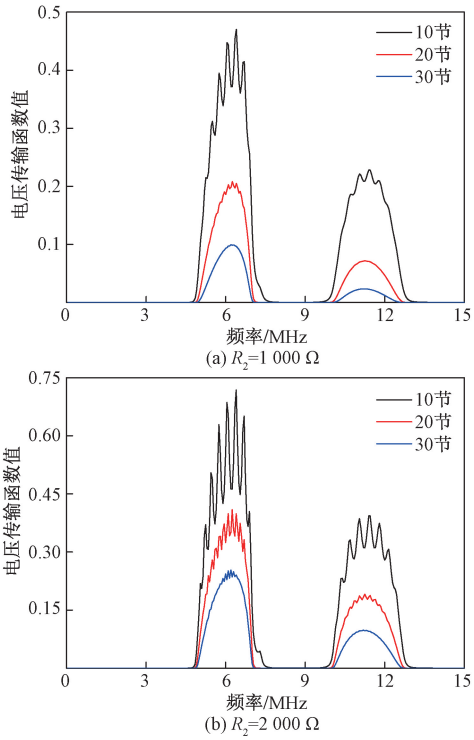

图 6　补偿电阻值对信道传输特性的影响

Fig. 6　Influence of the compensation resistance on the channel transmission characteristics

一些,适合作为信号传输通道。

(2)随着信道长度的增加,虽然通带内电压传输函数的峰值明显减小,但通带宽度基本不变,有利于频带信号的传输。

(3)在信道较短时通带内电压传输函数值会出现较大的周期性锯齿状波动,即信道特性存在畸变;这种锯齿状波动是由各节钻杆杆体传输线的反射系数随频率的变化所引起,由于各杆体传输线的电压传输函数值受频率变化影响的程度不同,当钻杆节数较少时,这种影响的差别被反映得较突出,使通带内的频率特性曲线出现较大幅度的脉动;当钻杆节数较多时,各钻杆电压传输函数阶乘的平滑效果使信道频率特性曲线变得较为光滑。由于通带内电压传输函数值的大幅度锯齿状波动会引起信号传输的严重失真,为解决这一问题,在钻杆节数 n 相对较小时,由于通过信道传输的信号幅度仍较大,可以将信号再通过一个传递函数为 $H(\omega)=\eta(\omega,n)^{-1}$ 的滤波器,利用 n 节钻杆信道电压传输函数的数学模型 $\eta(\omega,n)$ 来补偿信道特性畸变引起的信号频率分量变化,理论上可以消除信道特性畸变造成的信号传输失真。

(4)在钻杆节数相同时,图 6(b)中各通带的电压传输函数峰值均高于图 6(a)中对应通带的峰值,说明补偿电阻值偏离阻抗匹配时的阻值越大,杆体传输线终端将产生更高的反射电压使信道通带内的电压传输函数值得到大幅度提高,但通带内电压传输函数值的波动程度也会大幅度增加,虽然通过上述结论(3)的方法可以在一定程度上消除或减小这种信道特性畸变造成的信号传输失真,但如果这种波动过于剧烈反而会影响信号的可靠传输。因此,补偿电阻值也不能过大,应通过综合考虑将其限定在一定数值内。

综合以上分析,适当增大补偿电阻值可以使信道产生适用于频带信号传输的较宽通带,同时获得通带内较高的电压传输函数值;针对通带内出现电压传输函数值的周期性脉动影响,通过信道电压传输函数的数学模型 $\eta(\omega,n)$ 来补偿信道特性畸变引起的信号传输失真,可以明显改善信道的传输特性,有效提高信道的电压信号传输能力。

3.4　传输线终端反射系数的辐角分析

根据 $\Gamma_i=\dfrac{Z'_{Li}-R_c}{Z'_{Li}+R_c}$ 可以计算第 i 节杆体传输线的终端反射系数。图 7 为 C_2 = 159 pF 及 R_2 = 2 000 Ω 时多节钻杆组成的信道中,信号频率对最后一节钻杆杆体传输线终端反射系数辐角的影响。

从图 7 以看出,反射系数的辐角在信道传输特性的通带内均小于 120°,说明通带是由杆体传输线的反射电压对传输信号的加强所形成。此外,当钻杆节数较少时,通带内反射系数辐角存在较大幅度的周期性变化,与通带内电压传输系数的强烈周期性脉动相对应,印证和解释了信道特性畸变的产生原因。

保持补偿电容值 C_2 = 159 pF,取补偿电阻值 R_2 = 2 000 Ω,并利用图 6(b)的第二通带作为信道,信道中心频率为 11.3 MHz。通过计算,62 节钻杆组成信道的电压传输系数峰值为 -18.7 dB,信道带宽为 2.1 MHz;如果采用正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)进行数据调制,取信号载波频率为信道的中心频率,数据传输速率可达

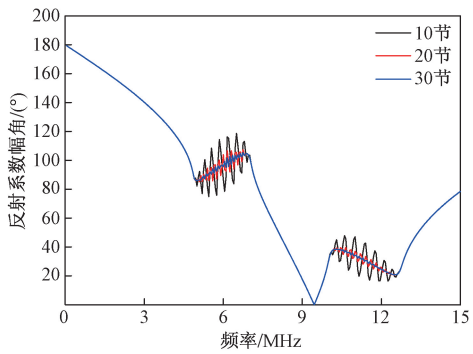

图 7　信号频率对反射系数辐角的影响

Fig. 7　Influence of frequency on the reflection coefficient phase

2.1 Mbit/s,中继距离为 620 m。参照 Grant Prideco 公司的电遥测钻柱井下信息传输系统,上述计算结果在与其信道衰减程度及数据传输速率基本相同情况下,中继距离被大幅度延长,远超过其 30 节钻杆组成的信道长度。

4 结论

(1)将布线钻杆的杆体同轴电缆看做具有分布参数的传输线,将电磁耦合器作为传输线负载,通过传输线理论研究布线钻杆的杆体传输特性,可以较好地反映信道对高频信号传输的影响。

(2)布线钻杆电磁参数的确定是改善信道传输能力的关键,通过在杆体传输线的终端或耦合器的输入端并联上适当的阻抗补偿元件,使传输线处于阻抗匹配状态来确定布线钻杆的电磁参数,为仅通过调整阻抗补偿元件参数值来改善信道的传输特性提供了基本条件。

(3)在确定布线钻杆电磁参数的基础上,通过增大阻抗补偿元件的电阻值使传输线处于适当的阻抗失配,利用阻抗失配产生的终端反射电压来增强传输线上的信号幅度,可以有效改善电遥测钻柱信道的电压信号传输能力,使中继距离大幅度延长。

参 考 文 献

[1] 李根生, 宋先知, 田守嶒. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 1-8.
Li Gensheng, Song Xianzhi, Tian Shouceng. Intelligent drilling technology research status and development trends[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 1-8.

[2] 沈 跃, 尹 笛, 贾 甲, 等. 负载力矩对旋转阀转速的影响分析及转速控制[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(12): 71-77.
Shen Yue, Yin Di, Jia Jia, et al. Analysis of influence of load torque on speed of rotary valve and speed control[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(12): 71-77.

[3] Ali R, Clayton M, Chris M, et al. Innovative technology to extend EM-M/LWD drilling depth[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: SPE, 2013: SPE 166190.

[4] 赵国山, 王斌斌, 都振川, 等. 钻柱中换能器声波信号传输特性实验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(30): 14-17.
Zhao Guoshan, Wang Binbin, Du Zhenchuan, et al. Experimental study on the transmission characteristics of transducer acoustic signal within drill string[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(30): 14-17.

[5] Jellison M J, Hall D R, Howard D C, et al. Telemetry drill pipe: enabling technology for the downhole internet[C]//SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam: SPE, 2003: SPE 79885.

[6] Foster R, Macmillan R. High speed telemetry on wired drill pipe, history, and impact on drilling process[C]//Offshore Technology Conference, Houston: OTC, 2018: OTC 28735.

[7] 孙浩玉. 智能钻杆磁感应传输技术及其信道特性分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 172-176.
Sun Haoyu. Technology of magnetic induction transmission of intelligent drill pipe and its channel characteristics[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(6): 172-176.

[8] 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.
Hu Yongjian, Huang Yanfu, Liu Yansheng. Joint simulation design of the channel of high-frequency magnetic coupling wired drill pipe[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(4): 475-481.

[9] 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.
Hu Yongjian, Wang Lan. Modeling high-frequency magnetic coupling wired drill pipe channel based on linear simulation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 120-126.

[10] Dan S, Olha S, Sigve A B. Improvement of wired drill pipe data quality via data validation and reconciliation[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(5): 625-636.

[11] Hughes R R, Steve D. Analysis of electrical resonance distortion for inductive sensing applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(14): 5818-5825.

[12] Jia J, Su Y N, Shen Y, et al. Circuit modeling and signal transmission analysis of inductive coupler in wired drill pipe[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 5538419.

[13] Flatscher M, Neumayer M, Bretterklieber T. Impedance matched electrical capacitance tomography system: front-end design and system analysis[J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(10): 104002

[14] 邱关源. 电路[M]. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 481-487.
Qiu Guanyuan. Circuit[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 481-487.

[15] 朱柯斌, 聂在平, 孙向阳. 基于电缆-无线耦合的随钻测井信号传输新方法及其数值模拟研究[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 16-24.
Zhu Kebin, Nie Zaiping, Sun Xiangyang. Numerical modeling of the signal transmission by cables and electromagnetic coupling for logging while drilling[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 16-24.

[16] Wu J Y. The trapezoidal clocking[C]//2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging. Anaheim: IEEE, 2012: 1817-1823.