

文章编号:1673-5005(2010)01-0055-05

声波在钻柱中的传播特性

赵国山, 管志川, 刘永旺

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:首先分析声波在管柱中的传播机制和特性, 接箍等效为声透层, 依据突变截面管和波导管声波传播相关理论, 利用传递矩阵法分析声波在钻柱中的透射和反射。对理想钻杆中沿管轴方向的纵波传播模型进行分析, 推导出纵波频率方程。利用色散曲线对钻杆中纵波传输的频域特性进行分析, 并通过有限长管试件进行声传输试验。结果表明: 钻杆和接箍的长度和截面积决定了钻柱的频带结构, 并且这种频带结构的变化呈周期性和对称性; 在钻柱信道中, 通带和阻带交替出现, 钻柱表现为一种梳状滤波器, 且在一个频带周期内随着频率的增加, 通带先变窄再变宽, 阻带则先变宽再变窄; 钻杆长度增加使通带变窄, 接箍截面积减小使通带变宽, 钻杆各节钻管的长度不一致会使通带变窄。

关键词: 钻柱; 周期性结构; 声信号传输; 通带; 阻带; 波数; 群速度

中图分类号: TE 927 **文献标志码:** A

Acoustic transmission properties in drill string

ZHAO Guo-shan, GUAN Zhi-chuan, LIU Yong-wang

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Firstly, the transmission mechanics and characteristic of acoustic wave within pipe string were analyzed. Joints act as acoustically transparent layers. Based on the theories of abrupt changes in the cross-sectional area of a pipe and acoustic waveguide, transfer matrix method was used to analyze acoustic transmission and reflection within drill strings. Secondly, the frequency equation of longitudinal wave was developed based on the transmission model that longitudinal waves propagate along the periodic drill strings. The frequency-domain characteristics of longitudinal wave propagation along the periodic drill strings were analyzed by using dispersion curves. The experiment of acoustic signal transmission was done with finite length pipes. The results show that frequency band mainly depends on the length of the drill pipe and area of the joints. The distribution of frequency spectrum exhibits periodic and symmetrical property. The pass bands and stop bands present alternately in this acoustical channel of drill strings which act as comb-filter. With the increase of frequency, the pass bands become narrow first and widen afterwards, and the stop bands widen first and become narrow afterwards in one frequency band. The pass bands become narrow with the length of drill pipes increasing, and the pass bands widen with the area of the joints decreasing. And the difference of drill pipes length leads to narrow pass bands.

Key words: drill string; periodic structure; acoustic signal transmission; pass band; stop band; wave number; group velocity

井下信息传输技术是实现石油工程领域中快速优质钻井目标的一项关键技术, 信息传输也是制约随钻测量技术发展和应用的“瓶颈”^[1-2]。声传输方式因具有结构简单、成本较低、易于定向发射等优点^[3-8]成为研究的热点, 同时石油钻井中井下连续的

钢质钻柱为声波的井下信息高速传输提供了条件。随着相关研究的深入, 井下信息声传输技术得到广泛关注, 并取得了一定的突破^[9-14]。但是, 钻柱中声波的信号严重衰减和测试深度浅等问题尚不能很好解决。笔者针对钻柱中声的传播和衰减特性及主要

收稿日期: 2009-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974131); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090133110005); 中国石油化工集团公司科技攻关项目(JP05006); 中国石油大学(华东)研究生创新基金项目

作者简介: 赵国山(1978-), 男(汉族), 山东泰安人, 博士研究生, 主要研究方向为井下系统、信息与控制工程。

制约因素进行研究,为声信号传输过程中抑制信号的衰减、减小井下环境的干扰和检测出有效的声信号提供理论依据。

1 声传播特性理论

1.1 管柱中声波传播的特性参量

位移方程为

$$u = (u_i \exp(jkx) + u_r \exp(-jkx)) \exp(j\omega t).$$

相速 c_p 定义为

$$c_p = \omega/k = 2\pi f/k.$$

群速 c_g 定义为

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(kc_p)}{dk} = c_p + k \frac{dc_p}{dk} = \frac{2\pi df}{dk}.$$

式中, u_i 和 u_r 分别表示入射波和反射波位移的法向分量; ω 为角频率; k 为波数; f 为频率。

1.2 周期性钻柱结构

在某种意义上,钻柱结构具有周期性特征。图1为由多节钻杆和管箍组成的周期性管结构。设 d_1, a_1, ρ_1, c_1 和 c_2, d_2, a_2, ρ_2 分别为钻杆和接箍的长度、截面积、密度和声速,则其色散方程^[9-10]为

$$\cos(kd) = \cos\left(\frac{\omega d_1}{c_1}\right) \cos\left(\frac{\omega d_2}{c_2}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z_1}{z_2} + \frac{z_2}{z_1} \right) \sin\left(\frac{\omega d_1}{c_1}\right) \sin\left(\frac{\omega d_2}{c_2}\right).$$

其中

$$z_i = \rho_i a_i c_i, i = 1, 2; d = d_1 + d_2.$$

图1 理想钻柱结构信道模型
Fig.1 Information channel model of idealized drill string structure

1.3 声透层模型

整个钻柱可以表示成由图2所示的分析单元结构周期性连接组成。对于周期性分布的接箍,取第 n 个接箍处进行研究,根据连续边界条件^[15],设接箍处的透射系数为 T_n ,反射系数为 R_n ,可得

$$\begin{cases} u_{nt} - u_{nr} R_n = u_{(n-1)t} T_n, \\ u_{(n-1)r} - u_{(n-1)t} R_n = u_{nr} T_n. \end{cases}$$

解得

$$\begin{bmatrix} u_{nt} \\ u_{nr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_n^2 - R_n^2}{T_n} & \frac{R_n}{T_n} \\ -\frac{R_n}{T_n} & \frac{1}{T_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{(n-1)t} \\ u_{(n-1)r} \end{bmatrix}.$$

图2 声透层周期性分布模型

Fig.2 Periodical distribution model of acoustically transparent layer

对于连续的由 N 节分析单元组成的分析模型,令声波在模型中的透射系数为 $T_N = u_{Nt}/u_{it}$,反射系数为 $R_i = u_{ir}/u_{it}$,一个周期内的相位变化为 $\exp(jkd)$ 。得到位移振幅的传递矩阵^[16]表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{Nt} \\ u_{Nr} \end{bmatrix} = \prod_{n=1}^N \begin{bmatrix} \frac{T_n^2 - R_n^2}{T_n} & \frac{R_n}{T_n} \\ -\frac{R_n}{T_n} & \frac{1}{T_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{it} \\ u_{ir} \end{bmatrix}.$$

令

$$\prod_{n=1}^N \begin{bmatrix} \frac{T_n^2 - R_n^2}{T_n} & \frac{R_n}{T_n} \\ -\frac{R_n}{T_n} & \frac{1}{T_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = M,$$

则

$$\begin{bmatrix} u_{Nt} \\ u_{Nr} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} u_{it} \\ u_{ir} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{it} \\ u_{ir} \end{bmatrix}.$$

设最后一段钻杆处为吸收边界条件,则

$$\begin{bmatrix} T_N \\ 0 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 \\ R_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R_i \end{bmatrix}.$$

透射系数可表示为

$$T_N = m_{11} - \frac{m_{12} m_{21}}{m_{22}}.$$

2 实例仿真分析

在使用过程中接箍处易发生磨损,使接箍截面积减小,钻杆长度差异较大。所以实例分析选用3种钻柱尺寸结构。钻柱组合1为 $d_1 = 8.69 \text{ m}, a_1 = 24.5 \text{ cm}^2, d_2 = 0.46 \text{ m}, a_2 = 130 \text{ cm}^2$;钻柱组合2为 $d_1 = 9.14 \text{ m}, a_1 = 24.5 \text{ cm}^2, d_2 = 0.46 \text{ m}, a_2 = 130 \text{ cm}^2$;钻柱组合3为 $d_1 = 9.14 \text{ m}, a_1 = 24.5 \text{ cm}^2, d_2 = 0.46 \text{ m}, a_2 = 90 \text{ cm}^2$ 。3种钻柱的 $\rho_1 = \rho_2 = 7870 \text{ kg/m}^3, c_1 = c_2 = 5.05 \text{ km/s}$ 。

图3为频率与 $\cos(kd)$ 关系曲线。由色散方程可知: $|\cos(kd)| < 1$ 时,得到的波数 k 为实数,实波数对应的解没有衰减,其对应的频率就构成通带; $|\cos kd| \geq 1$ 时,得到的波数 k 为复数,复波数对应的解则按指数速率迅速衰减,其对应的频率则构成阻

带。对频率与透射系数关系的分析,采用钻柱组合 1 的结构尺寸和 9 根钻杆、10 个接箍的组合形式进

行计算,结果如图 4 所示。

图 3 频率与 $\cos(kd)$ 关系曲线

Fig. 3 Relationship between frequency and $\cos(kd)$

的通带内群速度增大,这些频域特性的改善对纵波的传输有利。若钻杆尺寸不一致,则其通带是两条色散曲线的重叠部分,通带将变窄,频带的中心频率附近出现完全阻带,因此在选择发射频率时应避开这一频段。

图 4 频率与透射系数关系曲线

Fig. 4 Relationship between frequency and transmission coefficient

在图 4 中,曲线包络部分对应通带,包络部分之间对应阻带。根据分析可知,钻杆和接箍的长度和截面积决定了钻柱的频带结构,从图 4 中可以看到频带分布呈现通带和阻带交替出现的梳状滤波器结构特性和一定的周期性特征,在一个周期内通带先变窄再变宽,具有一定的对称性。

依据以上分析,对 3 种钻柱结构在低频范围内进行分析比较,计算得到频率与波数和频率与群速度的关系曲线,如图 5,6 所示。

图 5 中垂直于横坐标的直线段对应的频带为阻带,有弯曲弧度的曲线段对应的频带为通带,通带的边缘对应 $k = \pi/d$ 的整数倍,并且通带的宽度在这一频率范围内随频率的增大而变窄,通带内各频率的纵波在管壁中传播的相速与频率有关,同时也验证了在均匀钻柱中纵波波速与频率无关。

从图 6 也可以看到,群速度与频率有关,并且通带中心频率的波传播速度最大,而通带边缘的能量传输速度几乎降到了零,群速度表征了能量的传播,可见在阻带内声波能量很难传播。

当钻杆长度增大时,频带中心向低频偏移,接箍的横截面积减小使通带变宽,阻带变窄,并且相对应

图 5 不同结构钻柱的频率与波数关系曲线

Fig. 5 Relationship between frequency and wave number of drill string with different structure

图 6 不同结构钻柱的频率与群速度关系曲线

Fig. 6 Relationship between frequency and group velocity of drill string with different structure

3 声信号传输试验

3.1 试验系统

声信号传输系统如图7所示,主要由模拟钻柱、GFG-3015 信号发生器、激振器(5~5 000 Hz)、三轴加速度计、NI-PXI-PC 数据采集系统和 GW/GOS-652G 示波器组成。首先发射部分的脉冲发生器产生电信号,电信号激励激振器产生声信号,声信号通过传输媒质(模拟钻柱)传至接收加速度计,加速度信号通过信号调节器传至数据采集子模块进行分析处理。

图7 周期性钻柱结构试验系统

Fig.7 Experimental system of periodic drill string structure

3.2 试验结果

选取电压幅值 10 V 的正弦波信号作为激励信号。对由 4~6 根钻杆组成的传输介质进行试验,GFG-3015 信号发生器主设定频率选择 0.15~1.5 kHz 档位,频率选择 0.9~1.5 kHz,接收信号加速度

计位置如图7所示在最后一根钻杆端面(位置B),激振器与钻柱端面紧密接触,钻杆连接处要保证清洁、连接紧密。

激励信号频率与接收信号幅值的关系如图8所示。随着频率的升高,接收信号幅值呈下降趋势;钻柱结构对接收信号幅值有一定影响,同频率条件下随着钻杆数量的增加接收幅值均值下降。以理论计算的通带内频率 1.08 kHz 和阻带内 1.32 kHz 的接收信号波形和幅值谱为例进行说明(图9)。

图8 激励信号频率与接收信号幅值的关系

Fig.8 Relationship between input signal frequency and received signal amplitude

图9 接收信号波形和幅值谱

Fig.9 Received signal waveform and amplitude spectrum

由图9可知:频率位于通带内接受信号波形失真小,幅值谱中高频成分少;频率位于阻带内,接收信号失真程度大,幅值谱中高频(倍频)成分多。试验中还发现,钻杆连接处有杂质或连接不紧密时会加剧信号失真程度,激振器与钻柱端面接触不紧密时将产生较大的杂波干扰,试验中由于支撑的存在

会对接收信号造成一定影响。

4 结论

(1)理想钻柱的周期性结构使得它在信号传输中呈现通带和阻带交替的梳状滤波器结构特性,频带分布具有一定的周期性,在一个周期内通带先变

窄再变宽,而阻带则是先变宽再变窄,在一个周期内频带具有一定的对称性。

(2) 钻杆和接箍的长度和截面积决定了钻柱的频带结构,当钻杆长度增大时,频带中心向低频偏移,接箍的横截面积减小使通带变宽,阻带变窄,相对应的通带内的群速度增大,这些特性对声波的传输有利。结构尺寸不一致时,通带将变窄,频带的中心频率附近出现完全阻带,在选择发射频率时应避开这一频段。

(3) 对于同一结构,频率增加使接收信号幅值呈下降趋势。同频率条件下,当钻杆数量增加时接收幅值下降。频率位于通带内接受信号波形失真小,频率位于阻带内,接收信号失真程度较大,幅值谱中高频(倍频)成分多。

(4) 对于远距离声信号传输,频率应选择在钻柱结构频带的第一个周期内,且尽可能选择较低的频率,这样发射信号能量在传输过程中损失较小,频率还应选择在频带的通带内,以减小信号失真保证信号的提取;钻杆连接处有杂质或连接不紧密时会加剧信号失真程度,所以钻柱安装中要保证钻杆连接处清洁、连接紧密。

参考文献:

- [1] 沈忠厚. 现代钻井技术发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 89-91.
SHEN Zhong-hou. Development trend of the modern drilling technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 89-91.
- [2] 高德利, 刘希圣, 徐秉业. 井眼轨迹控制[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994.
- [3] 刘修善, 苏义脑. 地面信号下传系统得方案设计[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 88-92.
LIU Xiu-shan, SU Yi-nao. Scheme design of downward signaling system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 88-92.
- [4] 苏义脑. 地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2005, 2(32): 92-95.
SU Yi-nao. Geosteering drilling technology and its development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 2(32): 92-95.
- [5] 张绍槐, 张洁. 21世纪中国钻井技术发展与创新[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 63-68.
ZHANG Shao-huai, ZHANG Jie. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 63-68.
- [6] 李成, 丁天怀. 油气井测试的井下远程遥测方式分析[J]. 油气井测试, 2005, 14(6): 34-37.
LI Cheng, DING Tian-huai. Analysis of down-hole remote in oil well testing[J]. Well Testing, 2005, 14(6): 34-37.
- [7] 杜勇, 胡建斌, 李艳萍, 等. 声波传输测试技术在油田的应用[J]. 测控技术, 2005, 24(11): 76-78.
DU Yong, HU Jian-bin, LI Yan-ping, et al. Application of a voice wave delivering testing technology in the system of oil field[J]. Measurement & Control Technology, 2005, 24(11): 76-78.
- [8] 孙晓光, 刘广智, 冯遵城, 等. 油井参数声传输及井下发射控制[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1999, 29(4): 675-679.
SUN Xiao-guang, LIU Guang-zhi, FENG Zun-cheng, et al. Oil-well parameter acoustical transmission and under-pit emission control[J]. Periodical of Ocean University of Qingdao (Edition of Natural Science), 1999, 29(4): 675-679.
- [9] DRUMHELLER D S. Wave impedances of drillstrings and other periodic media[J]. J Acoust Soc Am, 2002, 112(6): 2527-2539.
- [10] DRUMHELLER D S. The propagation of sound waves in drill strings[J]. J Acoust Soc Am, 1995, 97(4): 2116-2125.
- [11] 李志刚, 管志川, 王以法. 随钻声波遥测及其关键问题分析[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(9): 6-9.
LI Zhi-gang, GUAN Zhi-chuan, WANG Yi-fa. Acoustic telemetry while drilling and analysis on its key problems[J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(9): 6-9.
- [12] GAO L, GARDNER W, ROBBINS C, et al. Limits on data communication along the drillstring using acoustic waves[R]. SPE 95490, 2005.
- [13] VIMAL Shah, WALLACE Gardner. Design considerations for a new high data rate LWD acoustic telemetry system[R]. SPE 88636, 2004.
- [14] NEFF J M, CAMWELL P L. Field-test results of an acoustic MWD system[R]. SPE/IADC 105021, 2007.
- [15] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [16] 车小花, 乔文孝, 李俊, 等. 随钻测井钻柱声波的频谱特性[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 66-70.
CHE Xiao-hua, QIAO Wen-xiao, LI Jun, et al. Acoustic spectral characteristics of drill string of logging while drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(6): 66-70.

(编辑 李志芬)