

井筒中钻井信息的传输动态分析*

石在虹**

(中国科学院力学研究所)

刘修善

(中国石化石油勘探开发研究院)

石在虹等. 井筒中钻井信息的传输动态分析. 天然气工业, 2002; 22(5): 68~71

摘要 井眼轨道闭环控制技术是当今国内外钻井技术领域研究热点,而地面与井下的信息传输是这一高新技术中的重要环节。目前,地面与井下的无线信息传输系统主要是采用钻井液脉冲方式,而如何提高传输深度和传输速率一直是钻井液脉冲传输系统的研究主题。文章基于多相流理论,研究了钻井液脉冲信号的传输速度及其影响因素,分析了信号的动态传输特性和衰减规律。研究表明:脉冲信号在井筒中的往复传播类似于阻尼振荡;信号频率和钻井液粘度是影响信号衰减的主要可控因素;给出了一些计算和分析实例。文章的研究对现有钻井液脉冲传输系统的改进以及新系统的开发都具有参考价值。

关键词 地质导向 闭环控制 随钻测量 钻井液脉冲

地面与井下的信息传输是地质导向钻井和井眼轨道闭环控制技术中的关键技术^[1]。自20世纪60年代发明了钻井液脉冲的传输方法以来,地面与井下的信息传输取得了突破性的进展^[2,3]。目前,绝大多数的无线随钻测量与控制系统都是采用钻井液脉冲方式。

在钻井液脉冲传输系统中,人们最为关心的是信号的传输深度和传输速率。然而,钻井液中含有粘土、岩屑、重晶石粉等固相物质,并且往往存在着游离状态的气体而形成气泡,从而增加了问题的复杂性。本文综合考虑这些因素,对钻井液脉冲信号的动、静态传输特性及其影响因素进行了分析,试图为井筒中钻井信息传输系统的优化设计提供必备的理论基础和技术依托。

信号的传输速度

钻井液的流动属于气、液、固三相流,各相流体对信号的传输将产生耦合影响^[4]。根据多相流理论,可以得到钻井液脉冲信号的传输速度计算公式:

$$a = \frac{K_l}{\sqrt{1 \pm \frac{K_l}{E} + \left(\frac{K_l}{K_g} - 1 \right) + s \left(\frac{K_l}{K_s} - 1 \right)}} \quad (1)$$

其中

$$= 2(1 +) + \frac{1}{(1 +)} \left(1 - \frac{2}{2} \right), \quad = \frac{e}{D}$$

式中: ρ_g 、 ρ_l 、 ρ_s 分别为气相、液相、固相的密度, kg/m³; β_g 、 β_s 分别为含气率和固体浓度, m³/m³; K_g 、 K_l 、 K_s 、 E 分别为气相、液相、固相、管材的弹性模量, Pa; D 、 e 分别为钻杆的内径、壁厚, m; ν 为管材的泊桑比; “+”、“-”号分别对应于正、负脉冲信号。

影响信号传输速度的因素可归纳为: 钻井液的组分及性质、钻柱的尺寸及材料特性、环境参数等。在常规钻井条件下, 主要因素的影响规律(见图1~3)为: 钻井液密度升高, 信号的传输速度降低;

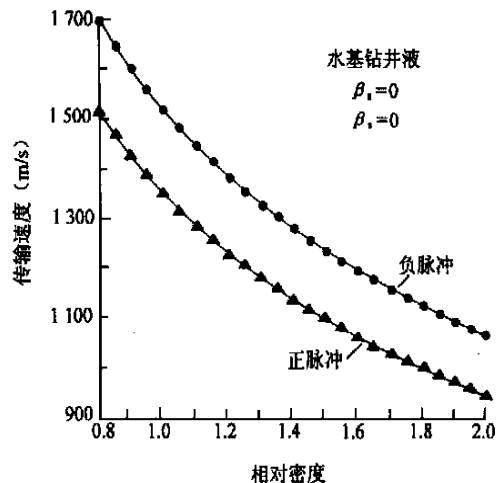


图1 钻井液密度的影响

* 本文为国家 863 计划基金项目 (820 - Q - 04)。

** 石在虹,女,副教授,1963年生;1985年毕业于大庆石油学院,1990年获硕士学位;现在中国科学院力学研究所攻读博士学位;出版学术专著1部,在 Oil & Gas Journal、石油学报等刊物及国际会议上发表学术论文30余篇。地址:(100080)北京海淀区中关村路15号。电话:(010)62562770。

含气量增加,信号的传输速度急剧下降;水基钻井液中的信号传输速度高于油基钻井液;负脉冲信号的传输速度高于正脉冲信号。

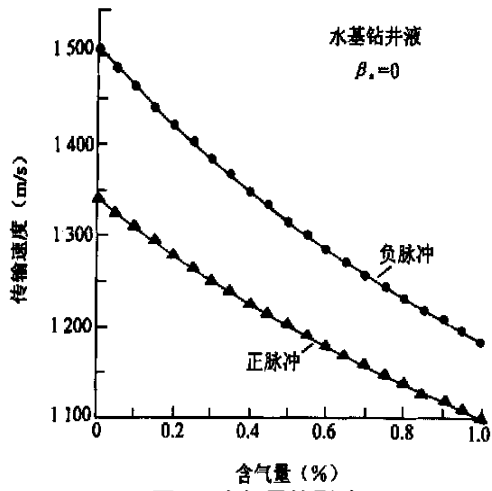


图 2 含气量的影响

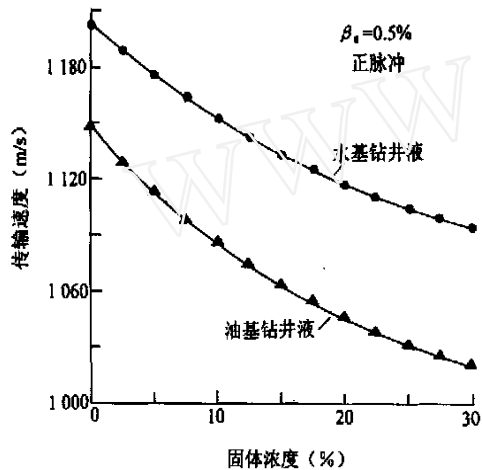


图 3 钻井液类型的影响

信号的动态传输特性

钻井液脉冲信号是以压力波的形式在井筒中传输的,它是一种动能和势能(压力能)之间的能量转换过程。应用一维不定常流动的运动方程和连续方程,可以得到描述信号传输特性的基本方程^[5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fv/v}{2D} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + v \sin \theta + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 为信号的传输速度, m/s ; H 为压力水头, m ; v 为钻井液流速, m/s ; f 为沿程损失系数; θ 为井斜角, $(^\circ)$; x 为管路轴向坐标, m ; t 为时间, s 。

求解这类问题的一种典型方法是特征线法。由于管道中的扰动将同时向上游和下游方向传播,所

以井筒中的钻井液脉冲将产生前行波和反行波。同时,井眼中的流动参数也是前行波和反行波的叠加。求解该方程组,首先需要用特征线网格来离散各方程。沿井筒的长度方向将其分成 n 段,其段长为 x ,并根据稳定性准则来取时间步长 t ,那么在 $x-t$ 平面上就可得到矩形计算网格,并且网格的对角线恰好是特征线。

沿特征线对流量 Q 采用二阶逼近,则有:

$$\begin{cases} H_P = C_P - T_A Q_P - R Q_P / Q_P / \\ H_P = C_M + T_B Q_P + R Q_P / Q_P / \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$C_P = H_A + (B - U) Q_A - R Q_A / Q_A / ,$$

$$C_M = H_B - (B - U) Q_B + R Q_B / Q_B /$$

$$T_A = B + U_A, T_B = B + U_B, B = \frac{a}{gA},$$

$$U = \frac{x \sin \theta}{2a}, R = \frac{f x}{4gDA^2}$$

式中: A 为管路的横截面积, m^2 ; 下标 P 表示当前时刻的计算点; 下标 A, B 表示前一时刻的相邻点。

图 4 和图 5 是对一口 3 000 m 直井的理论模拟结果。信号(正、负脉冲)产生在井口,并以 1200

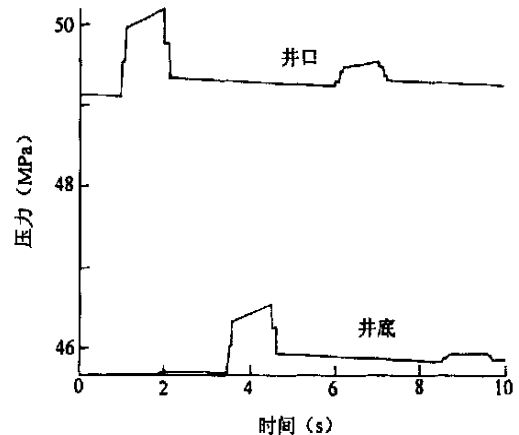


图 4 正脉冲信号

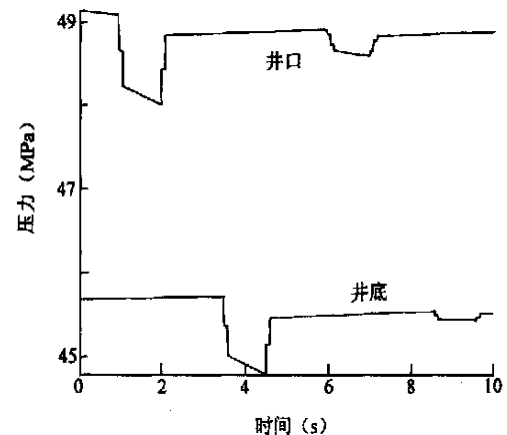


图 5 负脉冲信号

m/s 的速度在井筒中传播。研究与分析表明：井底与井口的信号存在一个延迟时间,该延迟时间就是钻井液脉冲的传输时间；由于系统阻尼的影响,信号在传输过程中存在着明显的衰减；钻井液的粘性阻力使信号的波峰(或波谷)变为一条斜线,表明存在着能量损失；在系统边界处,信号将产生反射。信号将在井筒中往复传播形成震荡波,并逐渐衰竭。经一定时间后,井筒中的流动逐渐趋于稳定,并恢复到原始的压力系统。

信号的衰减分析

由于钻井液粘性阻力和钻柱弹性变形的作用,信号在传输过程中,强度将逐渐衰减。信号沿井筒传输的能量损失大部分来自于摩阻,信号的衰减规律基本上符合指数关系^[6]：

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \quad (4)$$

其中：

$$L = \frac{D}{2} \sqrt{f\mu \left[1 \pm \frac{K_l}{E} + g \left(\frac{K_l}{K_g} - 1 \right) + s \left(\frac{K_l}{K_s} - 1 \right) \right]}$$

式中： p_0 为信号源的强度,Pa； x 为信号的传输距离,m； p 为传输 x 距离后的信号强度,Pa； μ 为钻井液粘度,mPa·s； f 为信号的频率,Hz。

信号的衰减程度主要与钻柱的尺寸及材料特性、脉冲频率以及钻井液的类型、组分、粘度和压缩性等有关,而与钻井液密度基本无关。在常规钻井作业中,钻柱的材料和尺寸不易变化,而钻井液体系的选择主要是以地质条件、油藏工程和钻井工艺的要求为依据。所以,这里主要分析了信号频率和钻井液粘度对信号衰减程度的影响,并以 p/p_0 作为信号强度衰减的评价指标。

研究表明:信号频率和钻井液粘度对信号的衰减程度均有显著的影响,但信号频率及其变化比钻井液粘度及其变化的影响相对更大。当脉冲频率较高、钻井液粘度较大时,信号衰减得更快(如图 6~8 所示)。这说明提高钻井液脉冲信号的传输速率和传输深度是一对矛盾,这也正是随钻测量技术亟待解决的难题。

结 论

(1) 钻井液各组分的含量和密度直接影响到其密度和压缩性。通常,随着钻井液密度和压缩性的提高,信号传输速度是降低的。信号的传输速度对

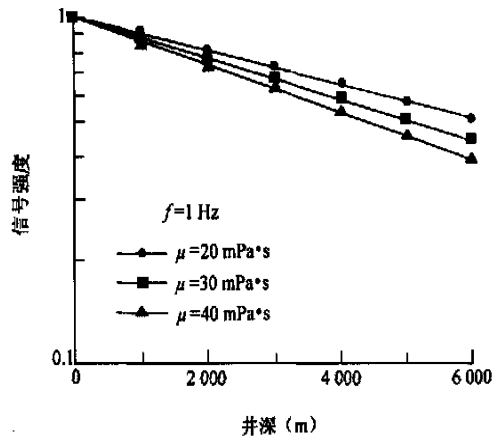


图 6 粘度对信号衰减的影响

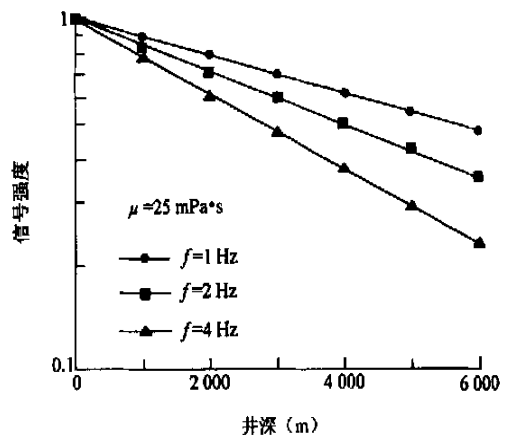


图 7 频率对信号衰减的信号

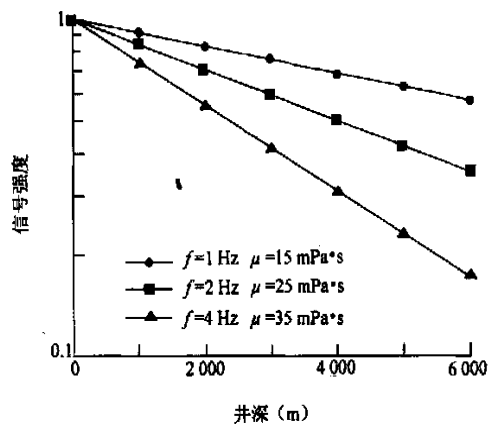


图 8 频率和粘度影响的综合分析

含气量非常敏感,随着含气量的增加,传输速度急剧下降。水基钻井液中的信号传输速度一般高于油基钻井液。负脉冲信号的传输速度高出正脉冲信号约 10% 左右。

(2) 钻井信号的传输过程是一种能量转换过程,存在着延迟和衰减,并且在系统边界处,信号将产生反射。钻井液脉冲信号在井筒中的往复传播类似于阻尼振荡,并逐渐衰竭。

(3) 信号的衰减程度主要与钻柱的尺寸及材料

考虑多孔介质吸附影响的 天然裂缝凝析气藏试井模型^{*}

黄全华^{**} 李士伦 郭平 孙雷 熊钰

(西南石油学院石油工程学院)

黄全华等. 考虑多孔介质吸附影响的天然裂缝凝析气藏试井模型. 天然气工业, 2002; 22(5): 71~74

摘 要 地下多孔介质因具有较大的比面积而对凝析油气流体具有较强的吸附能力, 多孔介质对凝析油气藏中流体的渗流具有不可忽略的影响, 文章根据天然裂缝性凝析气藏渗流特点, 首次将多孔介质吸附影响项直接纳入渗流微分方程中, 并建立了考虑多孔介质吸附影响的天然裂缝凝析气藏试井分析模型。利用拉普拉斯变换得出了模型的解, 绘制了试井分析理论曲线, 分析了理论曲线的特征, 给出了试井分析步骤, 并进行了实例分析。结果表明: 多孔介质吸附对试井解释结果具有较大影响, 考虑多孔介质吸附影响下的试井分析所得地层有效渗透率低于不考虑吸附影响时的情况, 但视表皮因子则相反; 考虑多孔介质吸附影响时的窜流系数低于不考虑吸附影响时的结果, 弹性储容比则相反。在进行实际试井分析时有必要考虑多孔介质吸附的影响。

主题词 凝析气井 多孔介质 裂缝(岩石) 吸附 试井 模型

基本假设

基本假设为: 地层中流体等温渗流, 服从达西定律; 地层中流体的流动是两相、两组分(气相和凝析油)烃类流体的流动; 储层水平、均质、等厚, 忽略重力影响, 毛管压力影响通过相平衡和相对渗透率曲线由物性参数的改变来间接反映, 而忽略扩散作用; 流体以吸附态和自由态两种状态存在, 仅自由态流体参与渗流, 吸附态流体解吸为自由态后

才参与渗流; 多孔介质中每个点均处于热力平衡状态, 即吸附平衡和相平衡都是瞬时完成的; 气井以恒定产量生产; 渗流物理模型采用 Warren - Root 模型, 且假设裂缝渗透率大于基岩渗透率, 考虑井筒储存和表皮效应。

数学模型

在参考文献 [1, 2] 中已得出了凝析气藏中流体渗流的微分方程。

特性、脉冲频率以及钻井液的类型、组分、粘度和压缩性有关, 而与钻井液密度基本无关。在常规钻井作业中, 信号频率和钻井液粘度是主要的可控因素, 并对信号的衰减程度均有显著的影响。信号频率比钻井液粘度的影响相对更大。当脉冲频率较高、钻井液粘度较大时, 信号衰减得更快。

参 考 文 献

- 1 刘修善, 苏义脑. 地面信号下传系统的方案设计. 石油学报, 2000; 21(6): 88~92
- 2 Arps J J, Arps J L. The subsurface telemetry problem—a practical

solution. JPT, 1964; 16(5): 487~493

- 3 Spinner T G, Stone F A. Mud pulse logging while drilling system design, development, and demonstration. IADC/ CAODC Drill Tech Conf, Houston, 1978: 313~327
- 4 刘修善, 苏义脑. 泥浆脉冲信号的传输速度研究. 石油钻探技术, 2000; 28(5): 24~26
- 5 刘修善, 苏义脑. 钻井液脉冲信号的传输特性分析. 石油钻采工艺, 2000; 22(4): 8~10
- 6 何树山, 刘修善. 钻井液正脉冲信号的衰减分析. 钻采工艺, 2001; 24(6): 1~3, 12

(收稿日期 2002 - 04 - 23 编辑 钟水清)

^{*} 本文由“油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金项目”(PLN0126)资助。

^{**} 黄全华, 1969年生, 博士, 主要从事油气藏工程研究。地址: (637001) 四川省南充市。电话: (0817) 2643910。

then a novel seal structure beneficial to increasing lifetime of the impactor is proposed through summarizing the merits and demerits of these structures. In light of laboratorial testing it is proved that the novel seal structure is of reliable operating performance and low price ,thus having great significance for raising the lifetime of the impactor and for popularizing on the spot.

SUBJECT HEADINGS : Impactor , Percussive-ratory drilling technology ,Petroleum ,Dynamic seal ,Natural gas

Yuan Guangjie, born in 1974 ,graduated in drilling engineering from Southwest Petroleum Institute and received his Master 's degree in 2001. Now he is studying for his doctorate in Shanghai Jiaotong University. Add: No. 1954 , Huashan Road , Shanghai (200030) ,China Tel : (021) 62934354 or 62933071

PREDICTION OF SAND-SETTLED HOLE INTERVAL BY USING " QUASISPIRAL PROPERTY " OF DRILLING STRING

Guo Yongfeng ,Jin Xiaojian and Chen Zhizhong (China Offshore Oil Technology Service Co.) . *NATUR. GAS IND.* v. 22 , no. 5. pp. 64 ~ 67 , 9/25/2002. (ISSN1000 - 0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT :The authors have developed a computer program by use of the finite element method ,which can determine the propant-carrying capacity of the drilling fluid in some hole interval by use of " quasi-spiral property " of the drilling string and through simulating the drill stem buckling form when sliding drilling is being conducted ,and the place of grievous and common sand-settled hole interval can be predicted through combination with fluid mechanics method. This prediction method can be used as one of the auxiliary measures used for preventing downhole accidents while drilling. The program has been tested and verified in the offshore oil field ,obtaining a satisfactory result. This program was applied for invention patent to the state.

SUBJECT HEADINGS : Drilling , Horizontal well , Drilling stem mechanics ,Drilling fluid , Cuttings beds , Finite element , Computer simulation

Guo Yongfeng (lecturer) , born in 1955 ,received his Master 's degree from University of Petroleum (Beijing) in 1994. He has been engaged in the computer software development and in situ technical

work for offshore oil well drilling. Add: China Offshore Oil Technology Service Co. ,P. O. Box 232 ,Beijing (101149) ,China Tel : (010) 84522883(O) or 13910798098

AN ANALYSIS OF DRILLING INFORMATION TRANSMISSION BEHAVIOR IN WELL BORE

Shi Zaihong (Research Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences and Liu Xiushan (Research Institute of Petroleum Exploration and Development , Sinopec) . *NATUR. GAS IND.* v. 22 ,no. 5. pp. 68 ~ 71 ,9/25/2002. (ISSN1000 - 0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT :The closed-loop control technology for well bore trajectory is research highlights in today 's well drilling field both abroad and at home ,and the information transmission from downhole to surface is an important link for this high and new technology. At present ,the drilling mud pulse is mainly used in the wireless transmission system to transmit the drilling informations from downhole to surface ,but how to improve the transmission depth and rate is a research topic all along for drilling mud pulse transmission system. Based on the theory of multiphase flow ,the transmission velocity of the drilling mud pulse signal and its influence factors and the transmission behavior and attenuation regularity are studied in this paper. The results show that the transmission of the drilling mud pulse along well bore is similar to damped oscillation and the frequency of the signal and the viscosity of drilling mud are the major controllable factors which affect the signal attenuation. Some calculated and analyzed results are given out ,which are of reference value for both improvement of existing drilling mud pulse transmission system and development of new systems.

SUBJECT HEADINGS : Geo-steering , Closed-loop control , Measurement while drilling ,Drilling mud pulse

Shi Zaihong (associate professor) , born in 1963 ,graduated from Daqing Petroleum Institute in 1985 and received her Master 's degree in 1990. Now She is studing for a Ph. D at the Research Institute of Mechanics ,Chinese Academy of Science. She has published a monograph and over 30 academic theses in *Oil and Gas Journal* and *Acta Petrolei Sinica* ,etc. . Add:No. 15 ,Zhongguancun Road , Haidian District ,Beijing (100080) ,China Tel : (010) 62562770