

油井出砂高频振动信号采集监测系统

刘刚,刘澎涛,韩金良,陈超,杨全枝
(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580)

摘要:油井在生产过程中适度出砂开采可以降低成本、提高开发效率和油井产能。通过室内模拟油井出砂环境实验,研发了一套对油井出砂产生的高频振动信号进行实时监测的系统。该系统通过对不同粒径的砂粒撞击管壁产生的高频振动信号进行时频分析,确定了砂粒撞击管壁产生的振动信号所在的频率段为10 000~20 000 Hz,得到了油井出砂状态下砂粒的振动特征频率,进而获得了不同出砂量与信号时域幅值和自功率谱幅值的关系曲线,实现了对油井出砂量的实时检测,验证了高频振动信号监测油井出砂的可行性。

关键词:油井出砂 实时监测 高频振动信号 时频分析 出砂量

中图分类号:TE358.1

文献标识码A

文章编号:1009-9603(2013)06-0108-03

油井在生产过程中,过度出砂不仅会损坏生产设备,而且还会对地面后期除砂造成严重的困难。适度出砂是在综合考虑出砂与防砂利弊基础上提出的一种生产策略^[1-2],该方法既可以提高油井产能,又能保证油井的最佳生产寿命,进而在有效地提高油田开采效率的同时降低开发成本^[3]。因此,需要一套能够检测油井出砂和出砂量的监测系统^[4-9],以便为将油井的出砂量控制在合理的范围内提供指导。笔者在研究油井出砂检测装置的基础上,研发了一套通过分析高频振动信号来监测油气井出砂量的系统;通过实验室出砂模拟实验^[10],得到了砂粒撞击管壁产生振动的高频信号特征,通过分析振动信号频率特征,验证了高频振动信号采集系统监测油井出砂的有效性。

1 高频振动信号采集系统

高频振动信号采集系统主要由硬件和软件2部分组成。硬件包括压电式加速度传感器和高速采集设备,软件包括信号采集软件模块和信号处理模块。高频振动信号由传感器采集经过滤波放大,然后经过高速采集卡将模拟信号转换为数字信号传送到计算机,由信号处理程序对其进行处理,从而实现了对出砂形成的振动信号的监测。系统中所采用的高速采集卡提供了外触发和软件触发2种触发源,连续采集、后触发采集、延时触发采集和连续触

发采集4种采集模式。动态库文件提供了一系列简单的函数,能够帮助用户完成设置和读数操作,实现实时采集并实时处理数据^[11]。

影响振动信号采集精度的因素主要包括采集方式、采样频率和量化精度。其中采集方式决定了采集信号的精度,采样频率决定于信号最高频率,量化精度取决于模数转化的位数。通过采样定理可以确定合理的采样间隔和采样长度,保证采样所得的数字信号能够真实地反应原始连续信号^[12]。

2 高频振动信号时频分析

作为非平稳信号处理的一个分支,信号时频分析主要利用时间和频率的综合函数对信号进行分析^[13],通过利用时间与频率的联合函数来表示非平稳信号并对其进行处理和分析。

2.1 非平稳信号

非平稳信号是指统计特性随时间变化的随机信号。砂粒撞击管道产生的振动信号可视为一种非平稳信号,非平稳信号的概率密度是时间的函数,其表达式为

$$\int p(x,t)dx = 1 \quad (1)$$

式中: $p(x,t)$ 为概率密度; x 为非平稳信号; t 为时间,s。

以 $p(x,t)$ 为基础,可以分别定义均值、均方值和

收稿日期:2013-09-17。

作者简介:刘刚,男,教授,从事油气井力学、信息与控制研究。联系电话:13365425805,E-mail:lg87323@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“海上油田适度出砂地面检测技术及装置研究”(2011ZX05024-003-005)。

方差分别为

$$m_x(t) = E[x(t)] = \int xp(x,t)dx \quad (2)$$

$$D_x(t) = E[x^2(t)] = \int x^2 p(x,t)dx \quad (3)$$

$$\sigma_x^2(t) = D_x(t) - m_x^2(t) \quad (4)$$

式中: $m_x(t)$ 为均值; $E[x(t)]$ 为期望值; $D_x(t)$ 为均方值; $\sigma_x^2(t)$ 为方差。

常用的非平稳信号的自相关函数和功率谱密度函数表达式分别为

$$R_x(t,\tau) = E\left[x\left(t+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\right] \quad (5)$$

$$S_x(t,f) = \int R_x(t,\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

式中: $R_x(t,\tau)$ 为自相关函数; τ 为延迟时间, s; x^* 为 x 的复共轭序列; $S_x(t,f)$ 为功率谱密度函数; j 为复数; f 为频率, Hz。

2.2 时频分析方法

2.2.1 时间域分析

振动信号的时间域分析主要研究振动幅值随时间变化的波形,具有直观、易于理解等特点,是描述振动信号最直接的方法,反映了信号幅值随时间变化的过程。主要包括均值、均方值和方差等统计信息。均值能够反映随机振动信号变化的中心趋势,均方值为信号平均能量的表达,方差表征了信号纯动态分量强度^[14]。

2.2.2 频率域分析

快速傅里叶变换是通过离散傅里叶变换进行改进获得的快速写法。振动信号的频率域分析是建立在傅里叶变换基础上的一种信号处理方法,可以表示信号各频率分量的幅值、相位与频率的对应关系。

频率域分析主要包括功率谱密度分析及幅值谱分析,功率谱表示单位频带内信号功率随频率的变化,反映了信号功率在单位频域的分布情况。幅值谱描述了振动的大小随频率的分布^[15]。

定义 $f(t)$ 为有限功率信号,则可以得到

$$R(\tau) = \lim \frac{1}{T} \int f(t)f^*(t-\tau)dt \quad (7)$$

$$p(w) = \lim \frac{|F_\tau(w)|^2}{T} \quad (8)$$

$$p = \frac{1}{2\pi} \int p(w)dw \quad (9)$$

式中: T 为周期, s; f^* 为 f 的复共轭序列; $p(w)$ 为功率谱值, m^2/s ; w 为相位, rad; $F_\tau(w)$ 为 $x(t)$ 傅里叶变换; p 为平均功率, W。

利用相关定理,自相关函数可以转化为

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int |F_j(w)|^2 e^{jw\tau} dw \quad (10)$$

式(10)两端乘以 $\frac{1}{T}$ 并取极限,可得

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int p(w)e^{jw\tau} dw \quad (11)$$

$$p(w) = \int R(\tau)e^{-jw\tau} d\tau \quad (12)$$

功率谱曲线 $p(w)$ 所覆盖的数值即为信号的总功率。

3 高频振动信号采集监测系统有效性分析

为了验证高频振动信号采集监测系统设计思路的有效性,从3个方面对其进行了验证:①自然状态下砂粒撞击管壁产生的振动信号特征分析;②模拟油井在出砂的情况下,监测砂粒撞击管壁产生的振动信号特征分析;③验证高频振动信号频谱特征与油井出砂量的关系。

3.1 实验装置

出砂模拟实验装置通过变频电机调节柱塞泵的流速控制出砂。实验采用80目石英砂粒,选用齿轮润滑油作为携砂流体。实验条件设定流量为1.2 m^3/h ,流速为2.51 m/s ,含砂量为0.2%,实验温度为27 $^\circ C$,油粘度为1 100 $mPa \cdot s$,信号采集装置及系统设定与砂粒撞击管壁实验相同。为了验证该系统用于非侵入式出砂监测方法的有效性,实验时将压力传感器安装于管路中的弯管处。

系统采集参数设置如下:选择1个采样通道,根据设定的采集信号频率选择设定采样频率为80 000 Hz,采样长度为8 192个点,采样间隔为10 ms,窗函数选择高斯窗,时域谱图坐标设定为手动。

3.2 油井出砂监测实验

为了分析砂粒撞击管壁产生的振动信号的有效频率范围,实验选用80目石英砂粒,以一定的高度撒向贴有高频传感器的管道,进行自然状态下砂粒撞击实验,对获取的撞击频率数据进行分析。由时频分析对比结果(图1)可以看出,监测系统能够有效感知砂粒撞击管壁产生的振动信号。通过对采集到的砂粒撞击管壁产生的振动信号进行分析,确定信号频率段主要集中在10 000~20 000 Hz的高频段。

由此,在油井出砂监测实验中将信号监测系统功率谱频段分别设定为0~10 000, 10 000~20 000, 20 000~30 000 Hz共3个监测频段。对振动信号进行采集监测并观测信号功率谱的变化。

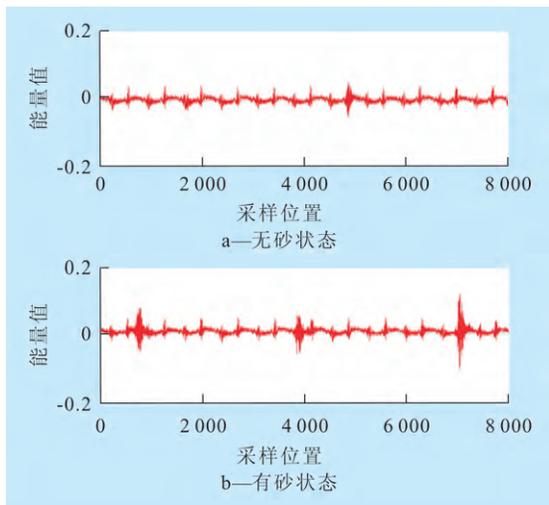


图1 油管无砂与有砂状态时频信号对比

将获取的时域谱进行数字滤波处理,得到不同测试条件下的时频分析结果(图2)表明,10 000~20 000 Hz 频率段内的振动信号与其他2组参数相比对砂粒撞击更加敏感。

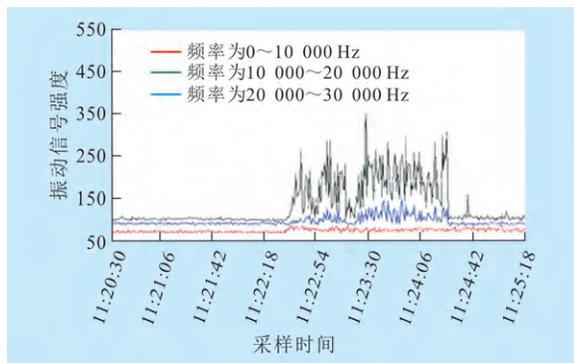


图2 油管有砂状态下不同接收频率振动信号强度

3.3 实验结果分析

实验结果验证了高频振动信号采集系统应用于出砂监测的有效性,以此为基础,通过对不同粒径、流速和温度条件下不同出砂量的频谱特征进行实验,可以得到不同出砂量与信号时域特征值和自功率谱能量值的关系曲线(图3),进而对油井的出砂量进行检测。

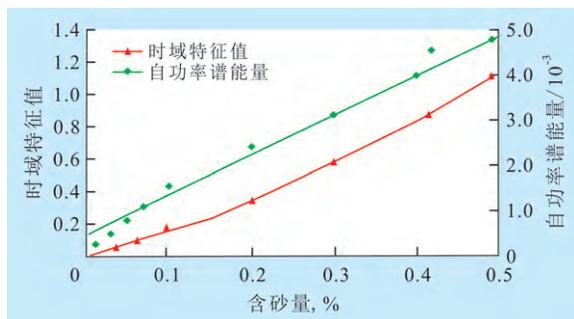


图3 油井不同出砂量与信号时域特征值和自功率谱能量值关系曲线

4 结束语

室内出砂模拟实验的结果表明,基于高频振动信号分析的振动信号监测系统能够有效地监测到砂粒撞击产生的振动信号,砂粒撞击管壁产生的振动信号所在的频率段为10 000~20 000 Hz,验证了信号与流体中的砂粒存在对应关系。通过分析不同出砂量与信号时域特征值和自功率谱能量值的关系曲线,可以实时监测油井的出砂量,对油井适度出砂检测系统的进一步研究具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 耿瑞平,李相方.油气井出砂信号的动态监测与处理[J].计算机测量与控制,2003,11(9):655-657.
- [2] 张艳玉,孙晓飞,李星民,等.出砂冷采稠油油藏泡沫油研究进展[J].油气地质与采收率,2013,20(1):63-66.
- [3] 杨浩,杨进,周长所,等.埕北油田稠油油藏出砂冷采工作制度优选模拟实验[J].油气地质与采收率,2011,18(4):102-105.
- [4] 唐洪明,王春华,白蓉,等.适度出砂对储层物性影响的室内评价方法研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(2):94-96.
- [5] 孙辉,李兆敏,吴仕贵,等.疏松砂岩油藏动态出砂定量预测技术[J].油气地质与采收率,2007,14(4):62-64.
- [6] 陆兆峰,陈禾,林立,等.压电式加速度传感器在振动测量系统的应用研究[J].仪表技术与传感器,2007,43(7):3-4,9.
- [7] Ibrahim M, Haugsdal T. Optimum procedures for calibrating acoustic sand detector, gas field case[C]. PETSOC-2008-025, 2008.
- [8] 李爱芬,赵栋,凡田友.考虑实际气体达西流动的气井出砂预测模型[J].特种油气藏,2011,18(1):113-116.
- [9] 刘正伟.海上疏松砂岩油藏出砂预测模型及应用[J].特种油气藏,2012,19(2):136-139.
- [10] 刘刚,贾宗文,牟哲林,等.稠油出砂监测系统设计及实验室评价[J].石油机械,2011,39(1):1-4.
- [11] 张玉华,马旭波. MATLAB在信号分析与处理中的应用[J].电力学报,2008,23(6):485-487.
- [12] 祝诗平.传感器与检测技术[M].北京:北京大学出版社,2006:52-92.
- [13] 葛哲学,陈仲生. MATLAB时频分析技术及其应用[M].北京:人民邮电出版社,2006:2-9.
- [14] 胡丽莹,肖蓬.快速傅里叶变换在频谱分析中的应用[J].福建师范大学学报:自然科学版,2011,27(4):27-30.
- [15] 李春林,伍勇.基于FFT与自相关函数的快速功率谱估计方法[J].舰船电子工程,2011,30(10):92-95.

Gao Baoguo, School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China

Wang Ping, Dai Caili, You Qing et al. Experimental study on shearing and salt tolerant deep profile control agents composed of inorganic aluminum gel. *PGRE*, 2013, 20(6): 100–103

Abstract: Aiming at the problem of poor shear performance and salt tolerance of organogel, the deep anti-shearing and salt tolerant profile control agent is composed using anhydrous aluminum chloride and urea. The gelling behavior of the deep profile control agents is studied in this paper. The effects of concentration, temperature, and salinity on the gelling law are investigated. The application performances of the profile control agents, including the injectivity, plugging ability, and flushing resistance are evaluated. The results show that both the concentration and the temperature have great influence on the gelation time, and the gelation time can be adjusted from 16 to 824 h by adjusting the concentration of anhydrous aluminum chloride and urea. The inorganic salts including Na^+ , Mg^{2+} , and Ca^{2+} have little effect on the gelation time. The salt tolerance, anti-shearing injectivity, plugging ability and flushing resistance of the gel system are very good, and the temperature limit is high as 80 °C.

Key words: inorganic aluminum gel; salt tolerance; shearing resistance; anhydrous aluminum chloride; urea; deep profile adjustment

Wang Ping, State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China

Wu Wenming, Qin Fei, Ouyang dong et al. Study on water plugging technology in fractured-cavity carbonate reservoirs, Tahe oilfield. *PGRE*, 2013, 20(6): 104–107

Abstract: Fractured-cavity carbonate reservoirs in Tahe oilfield have a serious heterogeneity, with numerous fissure, hole and cave. The bottom water is easy to breakthrough from high angle fracture, and it's difficult to make water control for producing wells, so, the water plugging becomes important to oil production stabilization and water cut control. There is a significant progress of water plugging technology in fractured-cavity carbonate reservoirs in Tahe oilfield. The factors weight method for selecting well water plugging and five basic factors comprehensive analysis for plugging wells are formed. Three kinds of suitable plugging agents for fractured-cavity carbonate reservoirs are researched and developed. First, the soluble silicate, with good heat resistance and salt tolerance, is appropriate for well with small leakage and seam-hole reservoir. Second, the solidified grain, which has density selectivity and high strength, good heat resistance and salt tolerance as well, is suitable for fractured-cavity wells. Third, the organic-inorganic compound gel, with water-oil selectivity, is fit for fractured wells, horizontal wells and sidetracking wells. Based on plugging agent, the supporting water plugging technologies are formed and applied with good performance, including density selectivity, multistage slug holder plug and control pressure acidification.

Key words: carbonate reservoir; fracture-vuggy reservoirs; water plugging technology; plugging agent; supporting water plugging technology; Tahe oilfield

Wu Wenming, Research Institute of Engineering Technology, Northwest Branch of SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Liu Gang, Liu Pengtao, Han Jinliang et al. High frequency vibration signal acquisition system used for sanding monitoring in oil well. *PGRE*, 2013, 20(6): 108–110

Abstract: Moderate sand yielding technology can exploit crude oil with low cost and high efficiency, and improve the well productivity effectively. This technology needs to control sand concentration of the produced fluid in a certain range, which requires real-time monitoring wells sand conditions. In order to study the method of real-time monitoring of the sand signal, the laboratory has developed a system of high frequency vibration signal used for monitoring the signal of sand. Through the time-frequency analysis of vibration signals of different sizes of sand hitting on the pipe wall in the laboratory simulation of sand production, the frequency range of the characteristic frequency of vibration signals reflecting the information of sand is screened out between 10–12 kHz, which proves the feasibility of the pipeline high-frequency vibration signal monitoring system. It has an important guiding significance for further study on sanding monitoring.

Key words: sanding; real-time monitoring; high-frequency vibration signal; time-frequency analysis; sanding yielding

Liu Gang, College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China