

# 振动信号分析用于出砂监测方法有效性研究

刘刚<sup>1</sup>, 韩金良<sup>1</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 杨全枝<sup>1</sup>, 李玉红<sup>2</sup>

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580
2. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007

**摘要** 海上稠油油田的适度出砂开采技术需要一种有效的实时出砂监测系统用以监测出砂信号, 目前使用的出砂声测法和 ER 法都存在不同的问题。声测法目前主要用于气井和稀油油井出砂检测中, 而 ER 法则存在寿命短、监测延迟等问题。因此, 提出了可以利用流体中的砂粒撞击管壁产生的振动信号作为出砂监测的新思路。为了验证这一方法的有效性, 在实验室内建立了一套用于模拟油井出砂的实验装置, 系统中主要采用压电式加速度传感器接受砂粒撞击的振动信号, 后期采用滤波、放大等动态信号的处理方法来处理; 实验中利用高粘度的齿轮油模拟稠油流体, 用柱塞泵、加热搅拌器来实现油井生产的出砂状况。实验采用 60 目砂样石英砂粒, 室温下粘度为 130mPa·s 的稠油, 实验过程中温度从室温逐渐增加, 每 5℃一个点, 到 70℃, 含砂量从无砂加到 0.8%, 实验过程中通过不断搅拌保持砂粒在流体中的悬浮和均匀。通过对采集到的数据进行功率谱分析, 试验结果表明, 将振动信号用于出砂监测有效性很好。

**关键词** 适度出砂; 振动信号; 出砂监测; 传感器; 动态信号分析

**中图分类号** TE355

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.21.012

## Effectiveness of the Sand out Monitoring Method by Applying Vibration Signal Analysis

LIU Gang<sup>1</sup>, HAN Jinliang<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, YANG Quanzhi<sup>1</sup>, LI Yuhong<sup>2</sup>

1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong Province, China
2. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China

**Abstract** The moderate sand mining technology of heavy oil field needs one kind of effective real-time monitoring system for monitoring the signal of sand out. However, the existing measuring methods, such as acoustic method and electrical resistant method, all have different problems in the actual productions. To solve these problems, a proposal that the sand fluid impact wall vibrations signal could be used as a new way for sand out monitoring is offered. In order to verify the effectiveness of the approach, a simulation system of sand out from well has been established in the laboratory, the system accepts the vibration signals of sand impact by using the acceleration sensor, and the dynamic signal processing method is adopted to process the data. In order to make the experiments consistence with actual situations, the high viscosity of gear oil is used to simulate the heavy oil in the system, and piston pump and heating blender is used to realize the simulation of sand out from oil well production. The apparent vibration signal of sand out is able to receive by the system. Through the dynamic signal analysis method, the data is processed using power spectrum analysis. The system could effectively monitor the change of sand content as the sand content increasing, the variance value, mean square root value, power spectrum amplitude of sand vibration signal and characteristic value of signals will increase. By the means of processing data, the test indicates that using the vibration signal from sand for monitoring sand out has the good effectiveness.

**Keywords** reasonable sand; vibration signal; sand monitoring; sensor; dynamic signal analysis

收稿日期: 2012-03-14; 修回日期: 2012-06-01

基金项目: 国家科技重大专项 (2011ZX05024-003-005)

作者简介: 刘刚, 教授, 研究方向为油气井压力控制理论及工艺技术、振动检测在油气钻采中的应用, 电子信箱: lg87323@126.com

## 0 引言

中国海域稠油资源量丰富。稠油油田高效开发具有极大的现实意义和深远的战略影响。适度出砂开采技术是在综合权衡出砂与防砂利弊基础上提出来的一种生产策略<sup>[1]</sup>,目的是提高稠油油藏的产能。因此需要找到一种能够有效用于实时监测油井生产出砂信号的方法,实现稠油的适度出砂开采<sup>[2]</sup>。

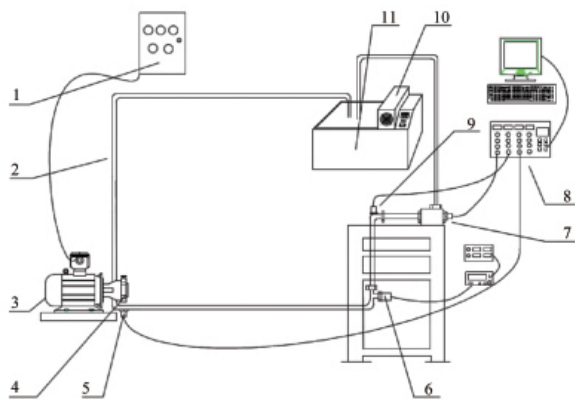
目前,国内外出砂检测的方法主要有声测法和电阻法<sup>[3]</sup>。出砂声测法主要由探头插入流动管道检测并接受砂粒的撞击信号,从而得到出砂信息,目前主要用于气井出砂和稀油出砂监测;电阻(Electrical Resistance, ER)法使用时探头接受砂粒撞击引起探头阻抗的变化得到出砂信号,具有寿命短、监测延迟等问题<sup>[4]</sup>。因此需要重新寻找一种有效的用于实时出砂监测的方法,本文采用监测砂粒撞击管壁产生的振动信号作为出砂监测的方法,为实时出砂监测提出了一种新的途径。

本课题组从“十一五”期间开始致力于振动信号用于稠油出砂监测的研究,主要完成了适用于振动信号采集的加速度传感器的研制这一制约课题研究的关键技术,并开发编写了相应的振动信号采集系统,建立了相对完善的实验装置。目前主要在对于更小砂粒和极低含砂量情况下的出砂监测方面进行研究。通过对主要相关研究领域发表的文献调研发现,稠油出砂给油田现场生产带来极大的困扰,迫切需要一种有效的出砂监测方法来指导现场生产。因此,通过采用振动信号分析来监测稠油出砂为出砂监测提供了一个新的方向。

## 1 实验室内出砂监测效果评价系统

目前,中国石油大学(华东)研发了一套依靠监测流体中的砂粒撞击管壁产生的振动信号而出砂监测实验系统。该系统主要采用加速度传感器、信号滤波采集仪和计算机信号处理器等组成。

实验室内采用如图1所示的柱塞泵、电动机、高压软管



1—电源控制箱;2—高压软管;3—电机;4—变量柱塞泵;  
5、7、9—加速度传感器;6—压力传感器;8—信号采集仪;  
10—搅拌器;11—恒温加热器。

图1 室内油井出砂模拟实验装置

Fig. 1 Equipments of oil sand monitoring system in laboratory

和恒温加热搅拌器组成的模拟系统来模拟油井的生产状况,通过在恒温加热器中加砂来模拟油井出砂。通过安装在系统管路中的高频加速度振动信号传感器来接受砂粒撞击管壁产生的振动信号,通过信号滤波采集仪,采用专用的数据采集监测软件动态采集、分析、处理,得到有效的出砂信号。循环系统的管路内径为20mm,其材料主要由高压软管及不锈钢管组成。

## 2 振动信号采集监测系统

采用高频加速度传感器感受砂粒撞击管壁产生的振动信号,运用功率谱密度、概率密度函数的方差等数理统计方法对振动信号进行处理,从而得出有效的出砂信号。目前国内一些研究机构都在对此进行研究和应用。

采集监测系统主要包括高频加速度传感器、动态信号采集仪、信号调理电路等设备,软件包括信号采集软件及信号处理程序。

测量振动信号需要一种有效的振动信号采集系统,试验中为了增加对振动信号采集的有效性,采用了高频加速度传感器。加速度传感器是利用其内装晶体的压电效应,当外部受到一个振动加速度信号时会改变晶体的极化状态,在晶体内部建立电场,产生信号。该传感器具有灵敏度高、信噪比高、工作频率范围大等优点。

## 3 振动信号的分析处理方法研究

加速度传感器拾取振动信号转换为电信号后进行滤波、放大等处理,由计算机信息处理系统对振动信号进行时域分析和频域分析,得到有效的出砂信号。

### 3.1 振动信号的滤波、放大处理

采用监测砂粒撞击管壁产生的振动信号这一方法进行出砂监测,其中的普遍难题就是信号干扰,这类信号干扰产生于出砂之外的其他干扰源,例如液体/气体混合物的噪音、机械/结构性噪音,排除这类背景噪音产生的振动信号干扰主要利用振动信号后期数据处理过程中采用的滤波技术及信号的分析方法<sup>[5]</sup>。

数字滤波处理可以使信号特定的频率成分通过,而极大的衰减其他频率成分,通过计算让物理可实现的实际滤波频率特性逼近理想或给定的频率特性,以达到去除干扰提取有用信号的目的。可分为软件与硬件实现。滤波设计主要分为低通、高通、带通和带阻4种<sup>[6]</sup>,如图2所示。(1)低通滤波:通频带为 $0-f_c$ , $f_c-\infty$ 为阻带。(2)高通滤波:与低通滤波相反,通频带为 $f_c-\infty,0-f_c$ 为阻带。(3)带通滤波:通频带为 $f_{c1}-f_{c2}$ ,其他频率为阻带。(4)带阻滤波:与带通滤波相反,阻带其为 $f_{c1}-f_{c2}$ ,其他频率为通带。

### 3.2 振动信号的数据处理

流体携带砂粒撞击管壁引起的振动主要包括随机振动和瞬态振动,通用的处理方法是建立在统计力学和信息理论

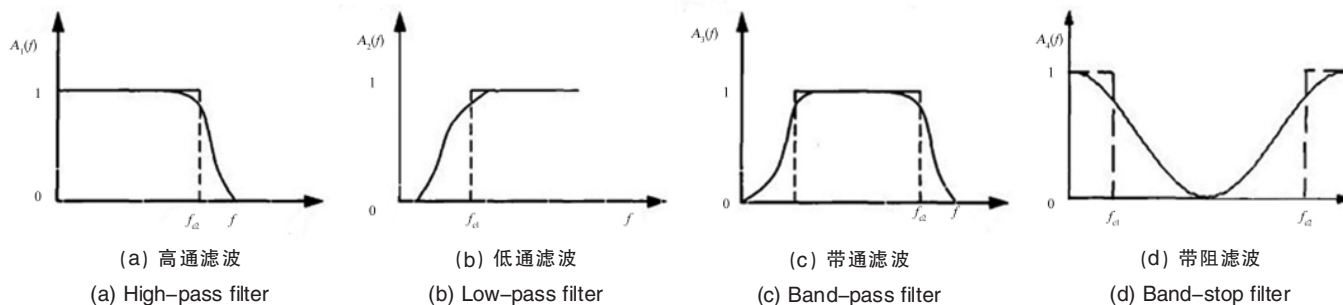


图2 滤波幅频特性

Fig. 2 Characteristic diagram of filtering amplitude-frequency

的基础上的,主要包括自谱分析和时域分析。

### 3.2.1 自谱分析

自谱分析是对一个信号进行频谱分析,主要包括傅里叶变换、功率谱密度分析及幅值谱分析等<sup>[7]</sup>。通过频谱分析主要可以解决下列问题:(1)求得振动参量中的各个频率成分和频率分布的范围;(2)求出振动参量各个频率成分的幅值分布和能量分布,从而求得主要幅度和能量分布的频率值;(3)由测试波形频谱分析得出的各频率成分、幅值和相位角,来校正测试波形,即通过考虑测量系统的幅频特性和相频特性的影响来反演测试波形,为求得真实波形提供重要条件。

频谱分析通常使用一定长度(例如1024点)的快速傅里叶算法即FFT分析方法,FFT为快速傅里叶变换,傅里叶变换的定义为

$$\text{正变换: } F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

其中, $\omega=2\pi f$ , $f(t)$ 为时域数据序列, $F(\omega)$ 为频域普函数序列。

### 3.2.2 时域分析

时域分析可以对多通道的信号从时间域上,即对时域波形进行分析,它显示信号随时间的幅值波形,从波形图上可以得到信号在各个时间点的幅值大小;可以观察信号幅度随时间的变化情况;可以搜索整个事件历程中信号的最大、最小、极大或极小值的位置;还可以进行多个信号的比较、压缩、叠加合成等操作<sup>[8]</sup>。

时域分析主要包括均值、均方值、方差及概率密度分布等统计信息<sup>[9]</sup>。其中均值反映了随机振动信号变化的中心趋势;概率密度反映了信号幅值的分布情况;均方值是信号平均能量(功率)的表达;方差是信号纯动态分量强度的表示。

## 4 振动信号的分析实验方法及结果分析

### 4.1 实验方法设计

为了最大程度的与实际生产条件相类似,实验室内选用高黏度的齿轮油作为携砂流体,利用分选出来的石英砂粒作为砂样,进行不同粒径的砂粒和含砂量的出砂监测实验。

实验在室温条件下进行,粘度约为130mPa·s,采用粒度

为60目的石英砂样,所采用的泵排量设定为0.45L/s,管道中流速为1.447m/s。

实验过程中,流体中从无砂开始,逐渐加大含砂量至8%,分别进行出砂监测实验,得到在不同含砂量情况下的振动信号,并进行分析。

实验中采用的高黏度齿轮油,与油田现场生产中的稠油黏度相类似。稠油在现场生产时由于黏度太大需要通过加热来增加流动性,实验中为了达到这一目的,主要通过柱塞泵、加热搅拌器来实现对稠油的加热与循环。

通过这样的设计,使得实验室内的稠油生产出砂模拟系统流程与实际生产具有相似性。

### 4.2 实验过程

实验过程中,加热温度从室温开始,实验系统中采用的加热搅拌器具有恒温加热的功能,通过设定加热温度,来实现对流体温度的控制。从20℃开始,每5℃为一个设定,逐渐增加到70℃。

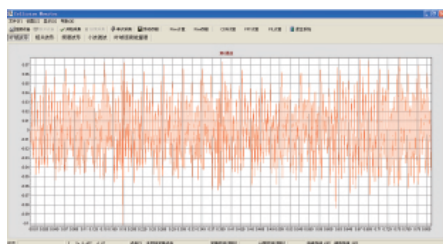
在每一个温度下,含砂量从无砂到有砂,逐渐增加含砂量。从0%开始,到0.05%、0.1%、0.2%、0.3%,逐渐增加到0.8%。

在加砂的过程中,打开搅拌器,保持砂粒的均匀和悬浮状态,从而增加砂粒撞击的随机性和有效性。

实验过程中随着温度的提高、含砂量的增大,计算机信号采集系统逐渐改变实验条件,从而采集到不同的振动信号。

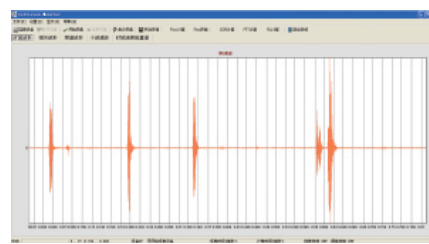
### 4.3 实验结果分析

为采集振动信号,本实验室开发了振动信号采集软件,信号采集软件界面如图3所示。含砂量不同情况下的振动信号特征值见表1。含砂量是影响出砂信号的最主要因素,含砂量越大,撞击管壁的机率越大,产生的振动信号强度越强。由表1中可以看出,从无砂到有砂,随着含砂量的增大,振动信号的时域幅值、方差值、功率谱幅值等均不断增大,由图3可以看出无砂与含砂时振动信号采集软件界面有明面的不同,说明砂粒在流经管道时明显的对管壁产生了一个撞击作用,产生了明显的振动信号。图4也清楚的表明了在不同含砂量下功率谱幅值的不同,从而验证了振动信号可以作为出砂监测信号的有效性。



(a) 无砂时信号采集软件时域界面

(a) Signal acquisition system interface without sand



(b) 含砂时信号采集软件时域界面

(b) Signal acquisition system interface with sand

图 3 振动信号采集系统界面

Fig. 3 Interface of vibration signal acquisition system interface

表 1 不同含砂量出砂振动信号特征值统计

Table 1 Characteristic values of sand vibration signal with different sand contents

含砂量/%	时域幅值	最小时域幅值	平均值	方差	标准差	频域幅值	功率谱幅值
0	0.7073	-0.6451	-0.0140	0.0302	0.1742	0.0056	23
0.05	0.9668	-0.97984	-0.01402	0.0374	0.19092	0.0124	49
0.1	1.2417	-1.4007	-0.01414	0.04542	0.2120	0.02066	74
0.2	1.6937	-1.67896	-0.01406	0.05344	0.2308	0.0284	102
0.4	2.1755	-2.17006	-0.0147	0.09124	0.30184	0.0364	130.6
0.6	2.9325	-2.80308	-0.0147	0.1311	0.36186	0.046	170
0.8	3.9632	-3.8881	-0.0138	0.1687	0.4088	0.0626	235

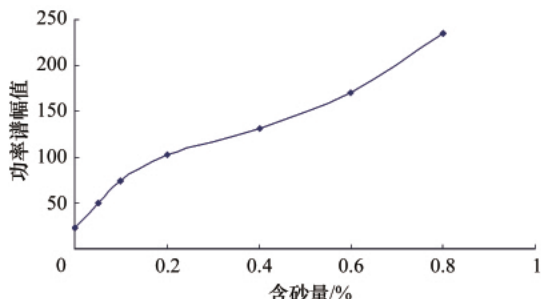


图 4 不同含砂量下的出砂信号的功率谱幅值对比曲线

Fig. 4 Comparative curve of power spectrum amplitude for the sand monitoring signal with different sand contents

### 5 结论

本文为实时监测油井出砂信号提供了一种新方法,为了验证这一方法的有效性,设计了一套用于室内的出砂监测实验装置,选择使用了新型的信号采集及监测系统;为了得到有效的出砂信号,对振动信号采取了滤波、放大等动态的信号处理方法,具有很好的实用性。通过实验,验证了将振动信号用于实时出砂监测上的有效性,为以后研发新的实时出砂监测系统提供了新的思路。

### 参考文献 (References)

[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.  
Geng Ruiping, Li Xiangfang. *Computer Measurement Control*, 2003, 11(9): 655-657.

[2] 房茂军, 曾祥林, 梁丹, 等. 稠油出砂规律及出砂模拟实验研究 [J]. 西

南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(6): 135-138.  
Fang Maojun, Zeng Xianglin, Liang Dan, et al. *Journal of Southwest Petroleum University: Science Technology Edition*, 2010, 32(6): 135-138.

[3] 刘彦成, 王健, 李拥军. 稠油开采技术的发展趋势[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2010, 12(4): 17.  
Liu Yancheng, Wang Jian, Li Yongjun. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010, 12(4): 17.

[4] 隋秀香, 郭旗, 李相方. 油气井测试出砂监测技术 [J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 110-112.  
Sui Xiuxiang, Guo Qi, Li Xiangfang. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(5): 110-112.

[5] 李利品, 高国旺, 任志平. 基于 DSP 和 FPGA 的数据采集系统设计[J]. 电测与仪表, 2008, 45(8): 42-44.  
Li Lipin, Gao Guowang, Ren Zhiping. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2008, 45(8): 42-44.

[6] 祝诗平. 传感器与检测技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 52-92.  
Zhu Shiping. *Sensors and detection technology* [M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 52-92.

[7] 铁道部科学研究院铁道建筑研究所. 振动测试和分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1979: 346-379.  
Railway Building Research Institute of Ministry of Railways Institute of Science and Technology. *Vibration testing and analysis* [M]. Beijing: China Railway Press, 1979: 346-379.

[8] 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(7): 3-4, 9.  
Lu Zhaofeng, Chen He, Lin Li, et al. *Instrument Technique and Sensor*, 2007(7): 3-4, 9.

[9] 赵东升. PVDF 压电薄膜制作传感器的理论研究 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(7): 748-750.  
Zhao Dongsheng. *Computer Measurement Control*, 2005, 13(7): 748-750.

(责任编辑 马骁骁)