

## 稠油热采井下光纤压力传感信号的小波降噪方法

韩吉声<sup>1</sup> 潘勇<sup>1</sup> 李士建<sup>1</sup> 芦志伟<sup>1</sup> 王金龙<sup>1</sup> 王为宇<sup>2\*</sup><sup>1</sup>中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司采油工艺研究院, 新疆 克拉玛依 834000)<sup>2</sup>清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084

**摘要** 提出了一种对稠油热采井下光纤非本征法布里-珀罗干涉型(EFPI)永久压力传感器采集的压力信号进行小波多分辨率降噪的方法,可有效抑制传感器采集压力信号中的非平稳噪声。提出了一种基于信噪比(SNR)提升的小波分解层数确定方法,无需真实压力信号频率范围的先验知识,可通过扫描信噪比提升随小波分解层数的变化估计最优小波分解层数。在新疆某油田稠油热采井的现场试验结果表明,该方法可提高压力信号信噪比约2.6 dB,且降噪后压力信号可显著提高对油田稠油热采井原油日产量的预测准确度。

**关键词** 光纤光学;光纤传感器;小波分析;井下压力传感器

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.090601

## A Wavelet Denoising Method for Optical Fiber Pressure Sensors in Heavy Oil Thermal Recovery Downhole Environment

Han Jisheng<sup>1</sup> Pan Yong<sup>1</sup> Li Shijian<sup>1</sup> Lu Zhiwei<sup>1</sup> Wang Jinlong<sup>1</sup> Wang Weiyu<sup>2</sup><sup>1</sup>Oil Production Technology Research Institute of Petro China Xinjiang Oilfield Company,

Karamay, Xinjiang 834000, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University,

Beijing 100084, China

**Abstract** A novel wavelet denoising method is proposed for the pressure surveillance of heavy oil thermal recovery well using white light extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) fiber-optic sensor. This method can effectively suppress the non-stationary noises and disturbances in downhole environment. A method for estimating the optimal wavelet decomposition level is proposed based on the analysis of the signal-to-noise ratio (SNR) enhancement varying with decomposition level. No prior knowledge of the real pressure signal spectrum is needed. The optimal wavelet decomposition level is determined by using the downhole pressure data collected in one of the heavy oil thermal recovery wells in Xinjiang, China. Field test results show that the proposed method can increase the SNR of pressure profile by 2.6 dB, and thus further effectively increase the accuracy of the forecasting result of daily oil production.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensor; wavelet analysis; downhole pressure gauges

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 120.3180; 120.2230

## 1 引言

油藏压力是对油藏进行动态分析的重要参数,对于预测油藏产量、制定开采计划、提高油气产量和采收率具有重要意义<sup>[1]</sup>。由于开采条件变化造成的油井压力改变能反映该油井的基本特性,因此通过间隔改变油井的产油率、实地检测油井压力等参数以及理论模型分析,可以了解当前油井的基本情况,有效制定油井开采策略。传统的油藏动态监测方法包括生产测井、饱和度测井、同位素测井等。为实现油井压力的实时连续监测,井下永久压力监测是行之有效的办法。油井生产的实践说明,放置永久压力传感器不仅可以降低油井监测成本,还能根据海量监测数据优化产油量、预防生产事故。目前国内外在井下放置的永久压力传感系

**收稿日期**: 2012-05-04; **收到修改稿日期**: 2012-06-13; **网络出版日期**: 2012-08-03

**作者简介**: 韩吉声(1959—),男,高级工程师,主要从事稠油井测试及解释方面的研究。

E-mail: hanjisheng@petrochina.com.cn

\* **通信联系人**。E-mail: wwy96@mails.tsinghua.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://opticsjournal.net>)

统可以分为毛细管压力监测系统<sup>[2]</sup>、电子压力传感系统和光纤传感系统<sup>[3]</sup>。毛细管测压始于 20 世纪 80 年代,目前已成为成熟的压力监测方法,它具有精度高、寿命长、可不停产测量的优点,但是成本较高。电子压力监测方法具有精度高、速度快、测量范围大的优点,但是抗电磁干扰能力差、寿命短。光纤压力传感器体积小、质量轻、不受电磁干扰,非常适合在井下永久放置,具有其他方法无法比拟的优点,已经成为当前发展的重要方向。

井下永久实时测压在提供更多信息的同时,也带来海量数据的处理工作。在稠油热采井下环境中,设备故障、温度改变、地震等因素均会在压力测量数据中引入时变的非平稳噪声。这些噪声给进一步的测井数据解释带来诸多困难,因此需要对采集的原始压力信号进行降噪处理。传统的降噪方法主要通过傅里叶变换(FT)实现,这种纯频域的信号处理方式只适用于平稳变化的压力信号和噪声,无法应用于统计参数随时间变化的非平稳信号和噪声。通过加窗改进后的短时傅里叶变换方法虽然能够对不同时刻的压力数据分别加以处理,但由于窗口长度固定,时间分辨率仍受到限制<sup>[4]</sup>。而应用纯时域的滤波方法(如均值滤波、中值滤波等)<sup>[5]</sup>,虽然考虑了不同时刻信号的区别,但由于滤波后信号综合了某时刻附近一区域内的所有信息,因此在滤除噪声的同时不可避免地会破坏真实压力信号,导致降噪后压力信号失真。

小波变换是兼顾时域和频域的信号处理方法,通过分层将信号的概貌和细节有效分离,通过对特定层的细节系数施加阈值去掉某一频率范围的时变噪声,之后再通过小波重构,得到信噪比(SNR)提高的信号。由于小波降噪方法可以有效抑制非平稳噪声,因此小波降噪方法已广泛应用于众多领域<sup>[6~8]</sup>。但目前还未见将小波降噪方法应用于井下压力信号降噪的报道,其主要困难在于井下(特别是稠油热采井下)环境的复杂性和未知性导致缺乏真实压力信号的先验知识(主要是频率范围信息),从而难以确定小波降噪参数,主要包括小波分解层数。根据小波分析理论,对于采样率为  $f_s$  的原始信号,经  $n$  层小波分解后概貌系数对应频率范围  $[0, f_s/2^{n+1}]$ ,细节系数对应频率范围  $[f_s/2^{n+1}, f_s/2^n]$ 。确定小波降噪方法中分解层数  $N$  的传统方法是使得经  $N$  层分解后的概貌系数频率范围包含真实信号频率范围,即保证小波降噪过程中的施加阈值操作不作用在真实信号上,以确保在滤除噪声的同时不破坏真实信号特征<sup>[6,7]</sup>。可以看到,上述传统方法需要真实信号频率范围先验知识。但对于在稠油热采井下采集到的原始压力信号,信号与噪声部分难以明确分离,同时由于井下环境存在未知性,不同稠油热采井下环境存在较大差别,因此难以预先提供明确的真实压力信号频谱范围,导致上述确定小波分解层数的传统方法不再适用。

本文结合井下本征法布里-珀罗干涉型(EFPI)光纤永久压力传感器的工作原理和小波降噪流程,提出了一种基于信噪比提升的小波分解层数确定方法。该方法无需真实压力信号频率范围先验知识,可通过扫描信噪比提升随小波分解层数的变化估计最优的小波分解层数。将该方法应用于新疆某油田稠油热采井下采集的压力数据,确定了稠油热采井下环境中最优的小波分解层数和小波基类型。现场试验结果指出本文提出的小波降噪方法可提高井下压力信号信噪比约 2.6 dB,且降噪后压力信号可显著提高对该油田稠油热采井原油日产量的预测准确度。

## 2 EFPI 传感器井下压力传感原理

EFPI 光纤压力传感系统如图 1 所示,主要包括井下传感器、单模传输光纤(SMF)、井上宽谱光源以及信息解调四部分。光源发出的光经光纤传输到达井下传感器法布里-珀罗(F-P)腔后,发生 F-P 干涉,干涉信号由光纤回传至井上,经光谱仪分析后解调。目前常用的谱分析解调方法包括傅里叶变换法、相关法、拟合法等<sup>[9~11]</sup>。FT 解调速度快、分辨率较低,拟合法解调速度慢、分辨率较高,因此本文采用 FT 预估和拟合法相结合的方法以实现较快的解调速度和较高的解调分辨率。

F-P 腔由两根光纤的端面形成,外面套上与之直径匹配的石英管保证两根光纤轴线的同轴度。中间的空气腔长随外界压力变化而变化,获取并解调 F-P 腔的干涉条纹即可获得压力的大小。利用宽谱光源进行 EFPI 获得白光干涉光谱,以实现绝对腔长的高分辨率测量。由于 F-P 端面的反射率仅有 4%,因此可将多光束 F-P 干涉简化为双光束干涉。干涉光谱  $I(\lambda)$  的表达式为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)R_1 \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1}(1 - R_1)^2 \eta_c + 2(1 - R_1) \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \eta_c \cdot \cos \delta \right], \quad (1)$$

式中  $I_0(\lambda)$  为光源光谱,  $R_1$  和  $R_2$  分别为入射光纤端面 and 反射光纤端面的反射率,  $\eta_c$  为光束经 F-P 腔传播后反射回入射光纤的强度耦合系数。余弦相位  $\delta$  是两干涉光束的光程差,  $\delta = \frac{4\pi G}{\lambda} + \pi + \delta_c$  [9],  $G$  为 F-P 腔长,  $\pi$  为光纤端面反射引入的半波损失,  $\delta_c$  为 F-P 腔中光波衍射形成的模式变化和 F-P 腔端面制作缺陷引入的耦合附加相位。传感器制作完毕后可将  $R_1$ 、 $R_2$  和  $\eta_c$  视为常数, 归一化干涉光谱  $I_{\text{norm}}$  可写为

$$I_{\text{norm}}(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = A + B \cdot \cos \delta. \quad (2)$$

假设光纤 F-P 腔在压力  $P$  下发生形变, 导致腔长  $G$  改变, 不考虑腔内气压, 改变量  $\Delta G$  可表示为

$$\Delta G = \frac{PLR^2}{E(R^2 - r^2)}(1 - 2\mu), \quad (3)$$

式中  $r$ 、 $R$  分别为石英管的内外半径,  $E$  为石英的杨氏模量,  $\mu$  为石英的泊松比。因此, 由腔长的变化量  $\Delta G$  可得到压力  $P$ 。

### 3 小波降噪流程与信噪比提升定义

小波变换是一种多分辨率分析方法, 可以根据信号的不同频率使用不同的窗口, 对信号进行时-频域分析。对任意函数  $f(t)$  的连续小波变换可写作 [6]

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (4)$$

式中  $f$  为时域信号,  $\psi$  为小波基函数,  $b$  为平移因子,  $a$  为伸缩因子。在对原始信号应用小波分解(实际为二进制离散分解)后, 可得到各层的概貌与细节系数, 且各层系数对应不同的频率范围。之后通过在特定层细节系数中利用某种准则施加阈值(阈值亦随层数变化), 将低于该阈值的系数置零, 高于该阈值的系数保留, 可得到阈值化后的小波系数。最后利用小波重构(即逆变换)

$$C_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (5)$$

得到重构后的函数  $C_f$  即为降噪后信号, (5) 式中的重构函数  $\phi$  与 (4) 式中的小波基函数  $\psi$  相对应。

在利用 EFPI 进行稠油热采井下压力测量时, 井下非平稳的温度波动通过热传导过程导致 F-P 腔长度随机变化 [12], 同时井下的岩石振动和蒸气湍流亦会通过声波改变腔长, 使得采集到的井下压力信号出现非平稳特征。由于 F-P 腔两反射面的低反射率(4%), 干涉光谱在经过传输光纤后信噪比较低, 进而由 (2), (3) 式恢复出的原始压力信号亦具有较低的信噪比。在信号处理领域, 信噪比的标准定义是真实信号功率 ( $P_{\text{signal}}$ ) 与噪声功率 ( $P_{\text{noise}}$ ) 的比值, 即

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}. \quad (6)$$

而对于在稠油热采井下采集到的压力数据, 由于无法准确获得井下真实压力信号, 在采集信号中难以明确区分真实信号和噪声, 因此采用信噪比提升, 即相对信噪比作为小波降噪方法性能的判据, 利用原始信号和降噪后信号方差的比率定义信噪比提升:

$$\langle R_{\text{SN}} \rangle_T^{\text{filtered}} - \langle R_{\text{SN}} \rangle_T^{\text{original}} = 10 \lg \frac{\langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^{\text{original}} + \langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^{\text{original}}}{\langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}} + \langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}}}, \quad (7)$$

式中  $\langle R_{\text{SN}} \rangle_T^{\text{filtered}}$  和  $\langle R_{\text{SN}} \rangle_T^{\text{original}}$  分别表示在观测时间  $T$  内降噪后信号和原始信号的信噪比,  $\langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^*$  和  $\langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^*$

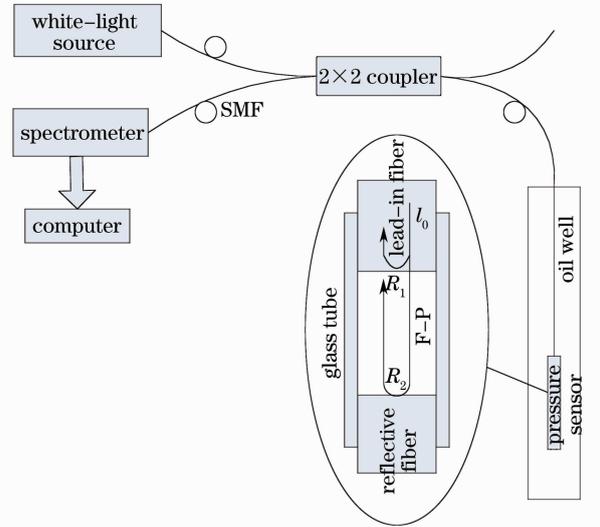


图1 用于井下测压的 EFPI 光纤传感系统示意图  
Fig.1 Schematic of EFPI optical fiber sensor system for downhole pressure measurement

分别表示在观测时间  $T$  内真实信号和噪声降噪前或降噪后的方差 (\* 代表 original 或 filtered)。由(7)式的定义可以看到,当降噪操作减小了噪声方差时(即  $\langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}}$  减小),信噪比提升增加。当降噪操作破坏了真实信号时,真实信号的方差亦减小(即  $\langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}}$  减小),但由于真实信号方差的绝对值大于噪声方差的绝对值(即  $\langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^{\text{original}} > \langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^{\text{original}}$ ,由于信号时域包络存在突变点以及低频漂移),因此其导致的信噪比提升量将明显高于由噪声方差降低引入的影响,进而出现信噪比提升的快速提高。由此可见,由(7)式定义的信噪比提升既可用于判断小波降噪方法性能,亦可作为降噪过程破坏真实信号的判据。(7)式中所选取的观测时间  $T$  是原始压力信号的总时间,即计算的是全局信号的方差,通过设置小波分解层数调整小波分析的时间和频率分辨率以滤除不同频率范围内的噪声。

## 4 现场试验结果与讨论

2011年4~10月对新疆某油田稠油热采井实地测压,得到海量压力数据。图2中蓝色线所示为从10月1日到10月17日每隔5s测得的约  $2.8 \times 10^5$  个压力数据点。

从图2可以看到,在起始5天,信号的时域包络变化较快,而在之后12天,信号的包络变化只存在低频漂移。同时信号时域包络上叠加了一高频振荡,由于井下压力信号的包络不会出现高频率的瞬间跳变,因此时域包络上所叠加的高频振荡可认为是外界环境和传感系统引入的噪声,且其方差随时间变化。由此可知井下采集压力真实信号及噪声的统计参数均随时间变化,属于非平稳信号及噪声。在应用小波降噪方法时,采用 Daubechies 系列小波基函数。作为正交的紧支集小臂, Daubechies 小波是最常用的小波基系列<sup>[6]</sup>, 由于其时域和频域的局部化强,适用于井下压力信号的降噪。同时利用斯特恩无偏估计(SURE)软阈值对各层细节系数施加阈值。

首先确定最佳的小波分解层数。图3显示了信噪比提升随小波分解层数的变化情况,其中信噪比提升利用(7)式进行估计,并采用 db6 小波基进行分解和重构。

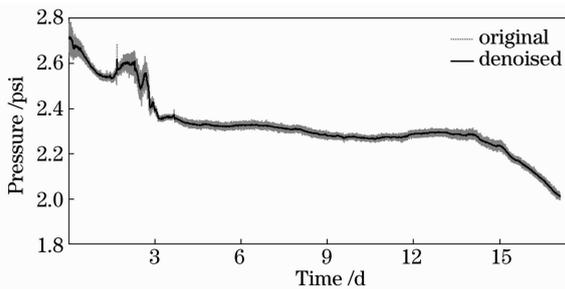


图2 井下压力原始信号与小波降噪后信号

Fig. 2 Original and denoised downhole pressure data

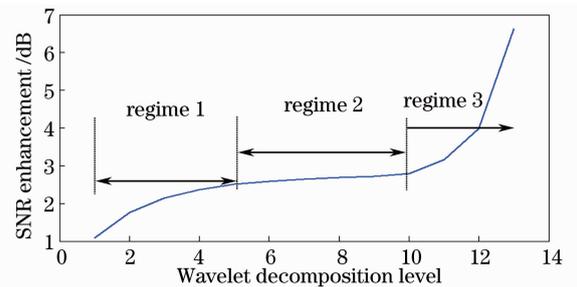


图3 信噪比提升随小波分解层数的变化

Fig. 3 SNR enhancement versus wavelet decomposition level

由图3可以看到,信噪比提升的变化分为3个区间。在区间1(1~5层),信噪比提升随小波分解层数的增加而增加。在此区间,小波降噪方法在有效减小噪声方差[即(7)式中  $\langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}}$  ]的同时,保持了真实压力信息[即  $\langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}} \approx \langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^{\text{original}}$  ],信噪比提升约 1.42 dB。在区间2(5~10层),信噪比提升出现饱和,这说明噪声主要分布在5层以下对应的频率范围,即使增加分解层数,  $\langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}}$  的进一步降低亦受到限制,此区间内信噪比提升仅 0.28 dB。在区间3(大于10层),信噪比提升显著提高,这是由于分解层数过高时,降噪操作破坏了真实压力信号,导致  $\langle \sigma_{\text{signal}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}}$  减小,进而信噪比提升量明显大于前两个区间内  $\langle \sigma_{\text{noise}}^2 \rangle_T^{\text{filtered}}$  降低带来的影响,此时降噪操作将改变真实压力信号的变化趋势。根据以上分析,最优小波分解层数位于区间2(即饱和区)的前端,在此位置小波降噪方法可在保留真实压力信号特征的前提下最大程度地滤除噪声。在图3情况下,最优小波分解层数为6层。由以上分析亦可以看到,图3试验结果中出现的3个区间与由(7)式得到的理论预测吻合,同时该方法不需要真实压力信号频率范围的先验知识,适合稠油热采井下压力信号的小波降噪。图4比较了利用2层、6层和13层小波分解的降噪结果,为清晰起见1.5~3.3天的信号被放大。可以看到,利用6层小波分解可以有效抑制原始压力信号中的非平稳噪声,效果明显优于2层小波分解。而13层小波分解则导致压力信号出现明显失真,进一步验证了上述结论。

除确定小波分解层数外,还需要根据井下压力信号的特征选择匹配的小波基函数(以及重构函数),以实现最佳降噪效果。表1列出了应用不同阶数的 Daubechies 小波基函数(db1~db8)时所得信噪比提升结果,此结果中小波分解层数为6层。由表1可以看出,db6小波与稠油热采井下压力信号的特征最匹配,得到最高的信噪比提升(2.6 dB)。图2中红色线即为此情况下的降噪后压力信号,可以看到降噪后信号在保持原始压力变化趋势的同时有效地抑制了噪声。

表1 采用不同 Daubechies 小波基进行小波降噪的信噪比提升结果

Table 1 SNR enhancement results of wavelet denoising using different Daubechies wavelet bases

Wavelet basis	SNR enhancement /dB
db1	2.572
db2	2.594
db3	2.590
db4	2.598
db5	2.598
db6	2.599
db7	2.593
db8	2.593

为进一步论证小波降噪的优越性,图5比较了在井下压力突变点附近(3.680~3.692天)利用均值滤波器、自适应中值滤波器、Savitzky-Golay型滤波器以及小波滤波的降噪效果。设置各类滤波器的参数使得其在平稳变化区间内(选取图2中6~9天)的信噪比提升相同(即降噪效果相同)。由图5可以看到,在原始信号突变点附近,小波降噪方法在有效滤除噪声的前提下最大程度地保持了真实信号的包络变化,即滤波后信号的变化幅度最接近原始信号包络的变化幅度。而利用各类时域滤波器降噪后的信号则出现了较大失真,即滤波后信号的变化幅度明显降低。比较而言,失真程度由小到大排序依次是 Savitzky-Golay 方法、自适应中值滤波器和均值滤波器。由此可知,小波降噪由于自适应地利用了时域和频域的信息,在正确选择分解层数的条件下,较时域滤波器可更好地保持真实信号的变化特征。

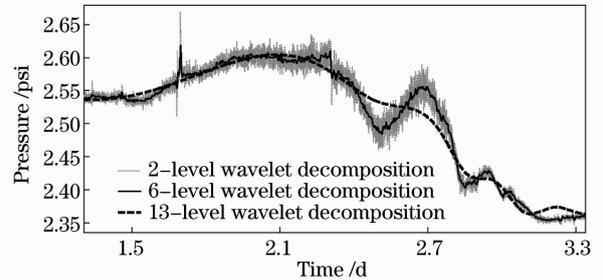


图4 利用不同分解层数进行小波降噪后压力信号的比较

Fig. 4 Comparison of wavelet denoising pressure signal using different levels of decomposition

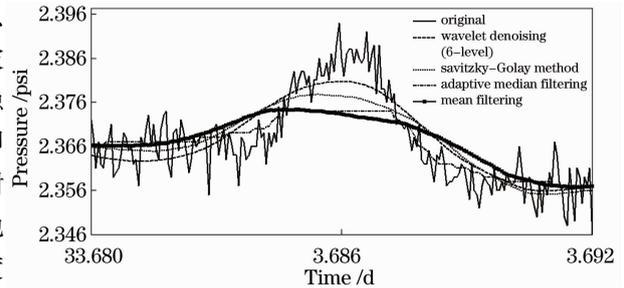


图5 小波降噪方法与时域滤波器降噪效果比较

Fig. 5 Comparison of wavelet denoising method and time domain denoising methods

## 5 利用压力降噪信号进行稠油热采井原油日产量预测

基于2011年4~6月得到的同一稠油热采井下压力信号,结合解释模型<sup>[13,14]</sup>可对原油日产量进行预测,如图6所示。图中将原油日产量预测结果与实测结果对比,亦将利用原始压力信号与降噪后压力信号预测出的产油信息进行了对比。

由图6可以看出,应用降噪后的压力信号解释出的日产量信息与实测值吻合较好,而降噪前的压力信号由于存在非平稳噪声,导致解释出的日产量曲线出现明显奇异点,与实测值偏差较大。因此,本文提出的井下压力数据降噪方法对产油信息的准确解释具有重要意义。

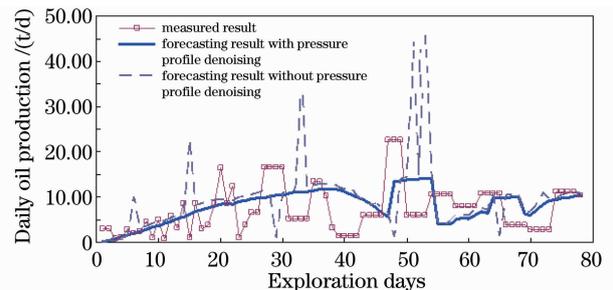


图6 降噪前后的压力信号解释出的产油信息

Fig. 6 Oil output interpreted by original and denoised pressure signals

## 6 结 论

通过对在稠油热采井下永久放置的光纤 EFPI 压力传感器采集数据的分析,提出了一种井下压力信号的小波降噪方法,可有效抑制传感器采集压力信号中的非平稳噪声。同时提出了一种基于信噪比提升的小波分解层数确定方法,无需真实压力信号频率范围的先验知识,可通过扫描信噪比提升随小波分解层数的变化估计最优的小波分解层数。在新疆某油田稠油热采井的现场试验结果证明了该方法的合理性和有效性。现场试验结果表明,当使用最优小波分解层数和小波基时,该方法可提高压力信号信噪比约 2.6 dB,且降噪后压力信号可显著提高对该油田稠油热采井原油日产量的预测准确度。通过与时域滤波器的比较指出了小波降噪方法的优越性。需要指出的是,本文目前利用全局信号的方差比率估计信噪比提升。若改为利用局部信号方差,则信噪比提升变为一时间相关量,降噪所需的小波分解层数亦随时间变化。

## 参 考 文 献

- 1 Fu Jianwei, Xiao Lizhi, Zhang Yuanzhong. Progress of permanent fiber optic sensor applications to oil and gas well[J]. *Progress in Geophysics*, 2004, **19**(3): 515~523  
付建伟,肖立志,张元中. 油气井永久性光纤传感器的应用及其进展[J]. 地球物理学进展, 2004, **19**(3): 515~523
- 2 Wang Zhiyuan, Huang Shurong, Lu Mei *et al.*. Application of pressure testing technology with capillary in Dagang Oilfield [J]. *Well Testing*, 2005, **14**(1): 65~70  
王志愿,黄淑荣,芦梅等. 毛细管测压技术在大港油田的应用[J]. 油气井测试, 2005, **14**(1): 65~70
- 3 Qi Bing, Pickrell Gary, Zhang Po *et al.*. Fiber optic pressure and temperature sensors for oil down hole application[C]. *SPIE*, 2002, **4578**: 182~188
- 4 E. Jacobsen, R. Lyons. The sliding DFT[J]. *Signal Processing Magazine*, 2003, **20**(2): 74~80
- 5 G. R. Arce. *Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach*[M]. New Jersey: Wiley, 2005
- 6 H. Krim, D. Tucker, S. Mallat *et al.*. On denoising and best signal representation[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1999, **45**(7): 2225~2238
- 7 B. Vidakovic. On time-dependent wavelet denoising[J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1998, **46**(9): 2549~2554
- 8 L. Yan, G. Liu, J. Guo. Selection of the best wavelet base for speech signal[C]. Proceedings of 2004 International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing, 2004. 218~221
- 9 Ming Han, Yan Zhang, Fabian Shen *et al.*. Signal-processing algorithm for white-light optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1736~1738
- 10 V. Bhatia, M. B. Sen, K. A. Murphy *et al.*. Wavelength-tracked white light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurements[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(3): 247~249
- 11 W. Pulliam, P. Russler, R. Mlcak *et al.*. Micromachined SiC fiber optic pressure sensors for high-temperature aerospace applications[C]. *SPIE*, 2000, **4202**: 21~30
- 12 J. Wang, J. Han, Y. Pan *et al.*. A new noise suppression algorithm for optical fiber temperature surveillance of heavy oil thermal recovery well[C]. *SPIE*, 2011, **8199**: 81991A
- 13 J. van Lookeren. Calculation methods for linear and radial steam flow in oil reservoirs[J]. *J. Petroleum Technol.*, 1983, **23**(3): 427~439
- 14 J. E. Gontijo, K. Aziz. A simple analytical model for simulating heavy oil recovery by cyclic steam in pressure-depleted reservoirs[C]. Annual Technical Conference and Exhibition, 1984, 13037-MS