

基于快速傅里叶变换的海上油气井试井解释潮汐效应消除方法

于伟强,赵洪涛,房鑫磊,李大亮

中法渤海地质服务有限公司 天津 300457

通讯作者:Email:yuwq@cfbc.com

引用:于伟强,赵洪涛,房鑫磊,等. 基于快速傅里叶变换的海上油气井试井解释潮汐效应消除方法[J]. 油气井测试,2020,29(6):1-7.

Cite: YU Weiqiang, ZHAO Hongtao, FANG Xinlei, et al. Elimination of tidal effect in well test interpretation of offshore oil and gas wells based on fast Fourier transform [J]. Well Testing, 2020,29(6):1-7.

摘要 针对不稳定试井中压力数据存在潮汐影响,且干扰模型判断和储层物性参数解释的问题,利用快速傅里叶变换方法识别并去除潮汐效应。将含有潮汐影响的压力数据进行规整化处理和快速傅里叶变换,使信号由时间域变换到频率域,各个潮汐分量在频率域表现为固定值,判断并识别出其频率,将各分潮所对应频率的幅值进行插值降幅处理,再经过快速傅里叶反变换和逆规整转换,得到处理后的压力数据。结果表明,原始数据经过快速傅里叶变换,噪声等信号会出现在相对高频区域;储层压力响应信息出现在相对低频区域;各潮汐分潮在频率域中以固定频率形式出现而被准确识别,插值降幅处理后压力的周期性波动得到抑制,压力导数径向流段和后期特征能够准确判断。该方法在处理原始压力数据的过程中不需要最优拟合,避免了结果的多解性和繁杂的计算量,为含有潮汐效应压力数据的矫正提供了一种有效手段。

关键词 不稳定试井;试井解释;潮汐效应;快速傅里叶变换;快速傅里叶反变换;频率;幅值

中图分类号:TE353 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.001

Elimination of tidal effect in well test interpretation of offshore oil and gas wells based on fast Fourier transform

YU Weiqiang, ZHAO Hongtao, FANG Xinlei, LI Daliang

China-France Bohai Geoservices Co., Ltd., Tianjin 300457, China

Abstract: Tidal influence of pressure data in unstable well testing influencing model judgment and reservoir physical parameter interpretation. The fast Fourier transform method is used to identify and remove the tidal effect. The pressure data with tidal influence is processed by regularization and fast Fourier transform, so that the signal is transformed from time domain to frequency domain. Each tidal component is represented as a fixed value in frequency domain. Its frequency can be determined and identified. The amplitude of frequency corresponding to each tidal component can be interpolated and reduced, and then the processed pressure can be obtained through inverse fast Fourier transform and inverse regularization transformation. The results show that after FFT, noise and other signals will appear in the relatively high frequency region; the reservoir pressure response information appears in the relatively low frequency region; each tidal component appears in the frequency domain in the form of fixed frequency and is accurately identified; after interpolation and amplitude reduction, the periodic pressure fluctuation is suppressed, and the radial flow section and later characteristics of pressure derivative can be accurately determined. During the processing the original pressure data, the method does not need to optimize the fitting, which avoids the multi solution and complex calculation of the results and provides an effective means for the correction of pressure data with tidal effect.

Keywords: transient pressure test; well test interpretation; tidal effect; fast Fourier transform; inverse fast Fourier transform; frequency; amplitude

压力恢复和压力降落等不稳定试井是评价储层物性参数、获取原始地层压力或平均地层压力的重要手段^[1]。海上油气井进行不稳定试井测试时,由于海水的涨潮落潮通过上覆岩石压力传导至储

层,会造成压力数据波动^[2],特别是浅层高渗储层生产压差较小时,潮汐效应更加明显,影响产能和储层物性参数解释评价的准确性。所以,对这类数据进行试井解释前,需要消除潮汐效应影响^[3]。将

正(余)弦信号、海水潮汐表数据直接叠加到原始压力数据去除潮汐等的方法,可以降低压力数据的波动幅度。但压力导数特征依然波动明显,模型的判断和解释结果的准确性没有得到解决。

在潮汐效应对压力数据的影响特征分析方面,Julien H. [4] 和 Milan L. H. 等 [5] 介绍了潮汐对储层不稳定压力测试的影响,并对主要的潮汐分量进行了描述。Pinilla J. F. 等 [6] 通过将地质力学原理与多孔介质中的流体流动方程耦合,建立了海洋潮汐对无限大储层的影响模型,并以此为基础,提出了在受潮汐效应影响的储层进行试井分析的替代方法。Eric C. 等 [7] 介绍了潮汐对储层瞬变压力的影响特征,以及利用潮汐数据获取综合压缩系数的方法。Gowtham T. 等 [8] 通过模拟数据叠加不同相位、幅值的潮汐波,讨论了压力导数受潮汐效应影响的程度。

潮汐效应的消除方法,主要在最优化拟合、平滑滤波、傅里叶变换频谱分析等方面进行了研究。Levitan M. M. 等 [9] 采用最小二乘拟合与三次样条插值相结合的方法消除潮汐。Zhao Y. 等 [10] 采用 SG (Savitzky-Golay) 窗口滤波方法平滑数据,再利用最小二乘对平滑后的残余信号,进行正弦或余弦的拟合求解,得到准确的潮汐信号,以此来消除潮汐影响。Acuna J. A. [11] 设定待求取的压力响应为压力导数形式,将其叠加三角函数导数,通过最优化拟合求得真实储层压力导数。李元生等 [12] 考虑不同类型的关井恢复压力函数,并叠加待求取的潮汐三角函数,运用最小二乘方法与实际关井压力恢复曲线拟合,得到潮汐压力函数系数,实现潮汐效应的剥离。Faidouzi M. M. [13] 通过插值邻近潮汐站的谐波分量,获得测试井位置潮汐规律,并用 SG 窗口滤波和三次样条插值方法拟合数据。Araujo M. A. 等 [14] 通过对测试数据进行傅里叶变换,并结合已知潮汐分量的频率响应范围,能够更准确地去除潮汐和噪声。Wu X. 等 [15] 在傅里叶变换的基础上,采用原始数据末尾添加零值来解决潮汐频率难以准确分辨的问题。

利用最小二乘的最优化拟合方法虽然可以得到平滑的数据 [16], 但往往忽略了潮汐效应特有的频谱特性,在最优化消除潮汐过程中可能会丢失储层信息。本文基于测试数据频谱特性识别并剔除潮汐效应,首先将含有潮汐信号的测试数据进行规整化处理,再进行快速傅里叶变换 (FFT), 得到规整化数据的频率-幅值特征。储层信息包含在频谱序列

的最低频部分;潮汐分量频率则位于 2.32×10^{-5} Hz 或 1.16×10^{-5} Hz 附近,即 1/12 h 和 1/24 h, 对应幅值明显高于周围频率,将该频率进行插值降幅处理,然后经过快速傅里叶反变换 (IFFT), 可以得到不含潮汐效应的压力数据。该方法不需要用准确的潮汐信号作为参考,为海上含有潮汐效应的异常压力数据提供了新的处理方法。

1 快速傅里叶变换

快速傅里叶变换 (FFT) 基于离散傅里叶变换 (DFT), 可以将时域内的离散信号转换为频率域内的离散信号。DFT 变换如下所示,即

$$X(k) = X(e^{j\omega}) \big|_{\omega = 2\pi k/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为原始压力数据点; $X(k)$ 为离散傅里叶变换幅值; N 为压力数据点个数。变换过程要经过 N^2 次乘法运算。

FFT 变换是 DFT 变换的快速算法。根据傅里叶变换的奇偶和虚实特性,对离散傅里叶变换进行了改进。快速傅里叶变换如下所示,即

$$\sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{\text{even}}(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} + e^{-j\frac{2\pi}{N}kN/2} \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{\text{odd}}(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2)$$

式中:等号左边为 DFT 变换表达式; $x_{\text{even}}(n)$ 为原始压力数据中的偶数序列; $x_{\text{odd}}(n)$ 为原始压力数据中的奇数序列。变换过程要经过 $2N \log_2 N$ 次乘法运算。

FFT 变换相比于 DFT 变换,算法运算复杂程度大大降低,对于庞大的原始压力数据,时域到频率域的变换效率显著提高。

2 海上潮汐信号 FFT 变换特征

海上潮汐主要有半日潮、全日潮和混合潮,海上各类潮汐可以看成由多个不同周期和振幅的分潮组成。半日分潮主要有 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 , 全日分潮主要有 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 。各天文分潮周期数据见表 1。

以渤海为例,潮汐主要由半日分潮 M_2 和全日分潮 K_1 组成 [17], 其中以半日分潮 M_2 占优 [18]。假设渤海某点 M_2 分潮和 K_1 分潮的振幅分别为 1.0 m 和 0.5 m, 则可以近似模拟该点的海水潮汐波动形态(图 1a)。对波形曲线进行 FFT 变换,得到频率-幅值关系曲线(图 1b)。

表 1 主要天文分潮的周期数据

Table 1 Main Periodic data of astronomical components

| 分潮名称 | 含义 | 周期/h |
|----------------|------------|-----------|
| M ₂ | 太阴主要半日分潮 | 12. 420 6 |
| S ₂ | 太阳主要半日分潮 | 12. 000 0 |
| N ₂ | 太阴主要椭圆半日分潮 | 12. 658 3 |
| K ₂ | 太阴太阳赤道半日分潮 | 11. 967 3 |
| K ₁ | 太阴太阳赤道全日分潮 | 23. 934 5 |
| O ₁ | 太阴赤道全日分潮 | 25. 819 2 |
| P ₁ | 太阳赤道全日分潮 | 24. 065 9 |
| Q ₁ | 太阴主要椭圆全日分潮 | 26. 868 2 |

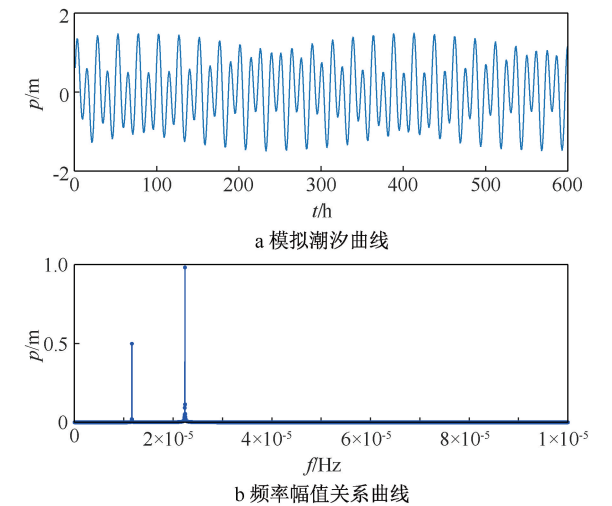


图 1 模拟潮汐曲线及其频率-幅值曲线

Fig. 1 Simulated tidal curve and its frequency-amplitude curve

从图 1 中可以看出,波形曲线由于两个信号的叠加,难以判断和抽取分潮周期与振幅;经过 FFT 变换后,在 M₂ 分潮和 K₁ 分潮对应频率(2.236×10⁻⁵ Hz、1.161×10⁻⁵ Hz)位置,即 1/12.420 6 h 和 1/23.934 5 h 处,出现两个明显的幅值变化,幅值分别为 1.0 m 和 0.5 m;从图中还可以看出,含有潮汐信号的数据经过 FFT 变换后,可以通过各分潮的周期和频率,非常直观地分辨出潮汐类型和潮汐幅值。

3 潮汐效应消除方法

潮汐引起压力波动的周期和频率一般比较固定;而储层物性引起的压力变化不会短时周期性波动,且在频谱图中小于潮汐频率,位于最低频位置;压力计分辨率和环境因素等导致的“噪声”则处于相对高频位置。所以,根据压力数据的频谱特征,可准确判断出潮汐频率位置 and 变化幅度。基于确定的潮汐频率,通过降低对应频率的幅值并进行 IFFT 变换,能够得到不含潮汐信号的储层压力响应曲线。

由于压力恢复或压力降落试井在关井初期压力变化幅度最大,潮汐影响可以忽略,但直接对原始数据进行 FFT 变换时,频率-幅值曲线上只有低频信息,相对中高频信息将被掩盖。为了克服这个问题,可将关井初期变化速率最大的时间段删除,并对数据进行规整化转换,即

$$p_{\text{trans}}(n) = p(n) - p_1 - \frac{p_N - p_1}{t_N - t_1} [t(n) - t_1] \quad (3)$$

式中: n 为压力数据点序号; $p(n)$ 为原始压力数据; $p_{\text{trans}}(n)$ 为规整转换后压力数据; t_1, t_N 分别为第一个点和最后一个点的时间; p_1, p_N 分别为第一个点和最后一个点的原始压力。

然后对转换后数据进行 FFT 变换。如果原始压力数据为等时间间隔采点,(3) 式可简化为(4) 式,即

$$p_{\text{trans}}(n) = p(n) - p_1 - \frac{p_N - p_1}{N - 1} \times n \quad (4)$$

规整变换后的压力数据首尾压力数据相等,整体形态与正弦波的半个周期相似,这一转换过程没有改变相对中高频信息。所以,频率-幅值关系曲线中,中高频段的幅值不再被低频掩盖,且与原始数据的相对中高频信息保持一致。

通过试井设计产生一组压力恢复数据,叠加两个频率的正弦信号,模拟生成一组受到潮汐效应影响的压力测试数据。储层选择径向复合模型,关井时间 500 h,模拟的潮汐分潮频率与图 1 频率相同,分别为 2.236×10⁻⁵ Hz、1.161×10⁻⁵ Hz。如图 2 所示为压力叠加潮汐前后的对比;图 3 所示为潮汐叠加前后,压力导数曲线形态对比。从图中可以看出,叠加潮汐后的压力导数形态中后期波动明显,分布分散,难以确定径向流直线段位置,而且后期曲线的上翘形态也被掩盖。

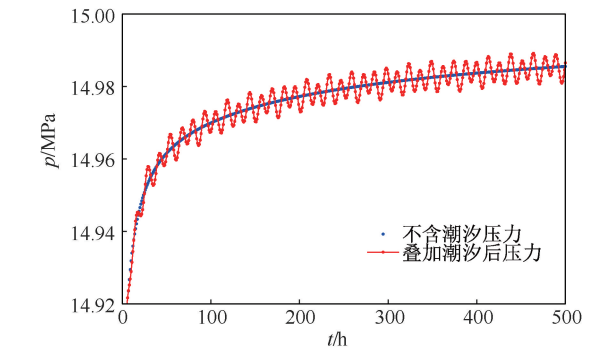


图 2 叠加潮汐前后的模拟压力数据

Fig. 2 Simulated pressure data before and after superimposed tide effect

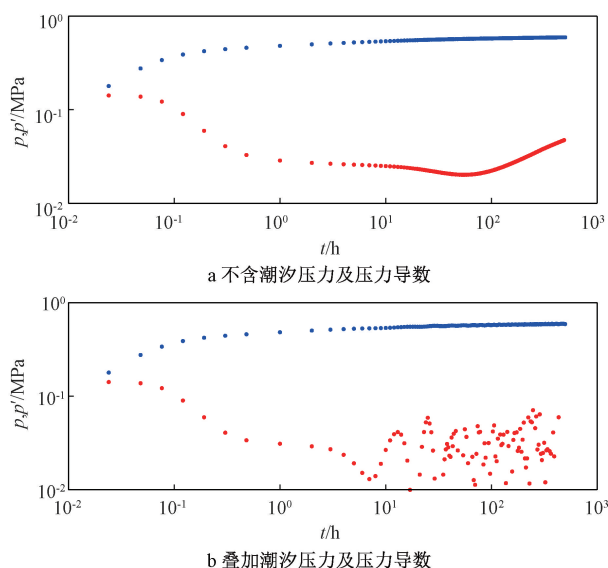


图 3 叠加潮汐前后的模拟压力导数数据

Fig. 3 Simulated pressure derivative data before and after superimposed tide effect

利用(3)式或(4)式对含有潮汐的压力数据进行规整化转换,转换后的压力数据再进行 FFT 变换。图 4 和图 5 分别为压力数据规整转换前后的 FFT 变换结果。

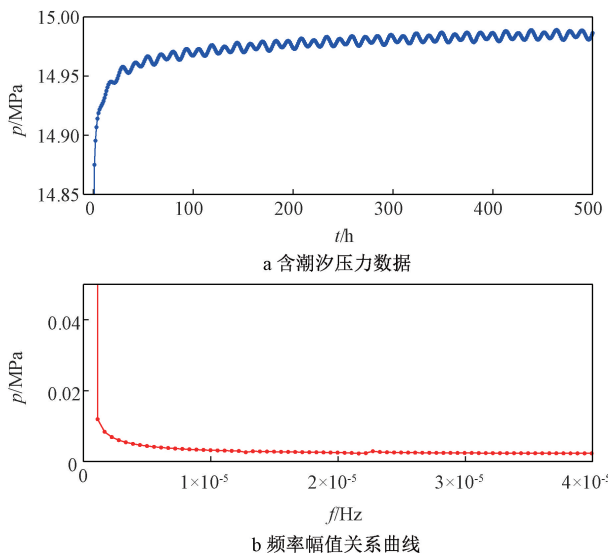


图 4 原始潮汐压力数据 FFT 变换

Fig. 4 FFT transform of original tidal pressure data

从图 4 和图 5 对比可以看出,含有潮汐信号的数据直接进行 FFT 变换,频率-幅值关系曲线中没有显示出潮汐频率特征;经过规整化处理,压力数据的 FFT 变换可以准确定位两个潮汐分潮的频率,通过降幅、IFFT 变换、逆规整化转换等过程,可以得到不含潮汐效应的压力数据。

利用 FFT 方法消除潮汐效应的主要过程:

(1)将含有潮汐信号的数据舍去关井初期变化剧烈的时间段,然后将剩余数据根据(3)式或(4)式进行规整化转换;

(2)对处理后的压力数据进行 FFT 变换,得到频率-幅值关系曲线;

(3)判断中段频率凸起位置是否与特定潮汐分潮频率对应,如果相互对应,则作为潮汐分潮频率进行插值降幅处理;

(4)对频率-幅值数据进行 IFFT 变换,得到不含潮汐的规整化压力数据;

(5)将 IFFT 变换得到的数据根据(3)式或(4)式进行逆规整化转换,并将开始舍去的关井初期数据补齐,从而使原始压力数据消除潮汐效应。

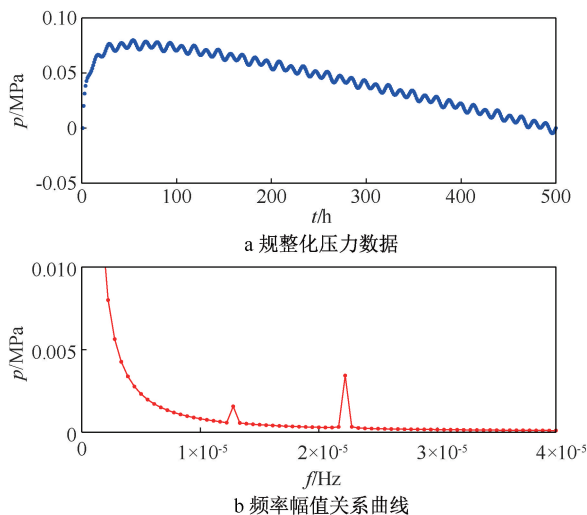


图 5 潮汐压力规整化数据 FFT 变换

Fig. 5 FFT transform of tidal pressure regularization data

经过 FFT 方法处理后的压力曲线如图 6 所示,潮汐引起的波动大部分被过滤,压力变化趋势没有改变,且相比于原始压力数据直接进行 FFT 变换,规整化压力数据 FFT 变换方法得到的压力在各阶段更平滑。

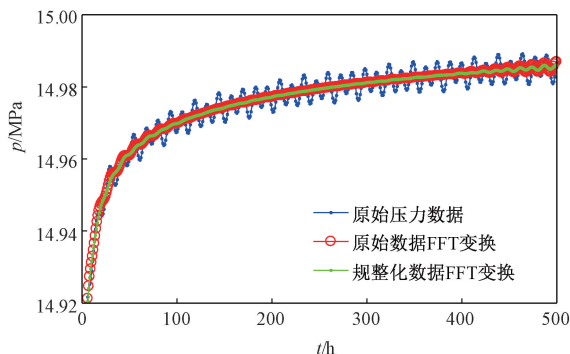


图 6 消除潮汐前后压力数据对比

Fig. 6 Comparison of pressure data before and after tide elimination

压力导数曲线如图7所示,径向流位置能够准确识别,与真实储层压力导数径向流参考位置一致;且后期径向流上翘幅度和时间也基本一致。

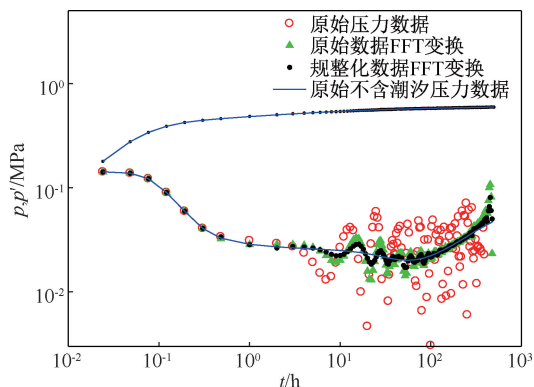


图7 消除潮汐前后压力导数数据对比

Fig. 7 Comparison of pressure derivative data before and after tide elimination

从模拟压恢叠加潮汐数据的处理结果可以看出,FFT变换方法通过分析原始信号的频率-幅值特性,对比潮汐分潮特定频率,可以准确识别并消除潮汐效应,解释得到准确的储层物性参数。

3 应用实例

以渤海两口受到潮汐影响的测试井为例,通过FFT方法对原始数据进行处理,然后利用处理后的数据进行试井解释获取地层参数。

3.1 A1井测试

A1井为渤海某区块一口生产井,油层中部垂深约1323 m,主要产层厚度9 m,孔隙度30%,井筒半径0.046 m;原油体积系数1.085,黏度30 mPa·s,综合压缩系数0.001299 MPa⁻¹。2017年对该井进行了关井压力恢复测试,采用钢丝作业下入存储式压力计,关井时间约110 h,关井前产油量约28 m³/d。关井前稳定流压11.73 MPa,关井末期压力约12.35 MPa,生产压差约0.62 MPa。通过下载存储式压力计数据,发现关井阶段潮汐效应明显,如图8所示为关井阶段局部放大图。

从图中可以看出,潮汐波动周期约12 h,波动幅度约0.00689 MPa。利用FFT变换方法得到A1井压力恢复数据的频率-幅值关系曲线(图9a)。从频率-幅值关系曲线中可以清晰分辨出在1/12 h和1/24 h两个频率附近有幅值升高,对应了测试井附近实际潮汐的两个分潮;利用识别出的两个分潮频率值和幅值对应关系,可以近似反推出潮汐曲线(图9b);离测试井位置最近的潮汐监测城市曹妃甸,记

录了测试期间潮汐变化(图9c)。从图中可以看出,根据原始压力数据分析频率进而反推的潮汐,跟附近的实际潮汐形态和相位几乎相同。

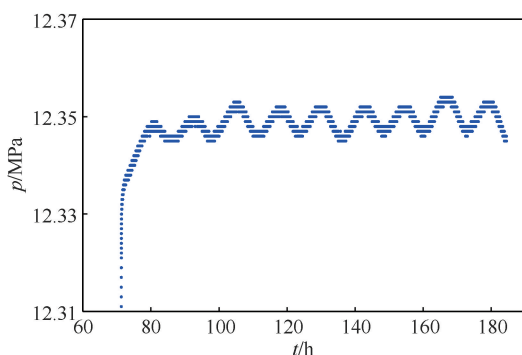
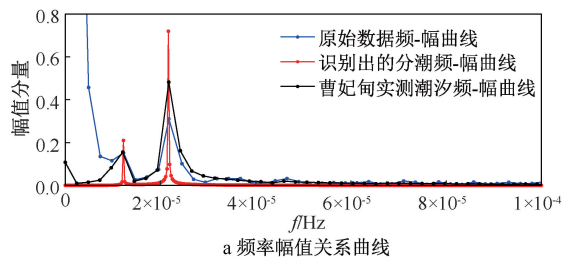
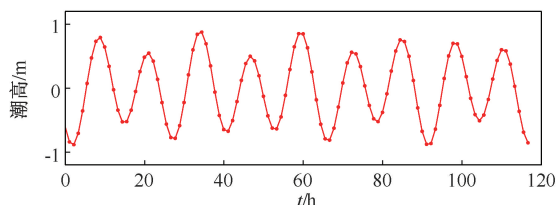


图8 A1井关井压力恢复测试数据

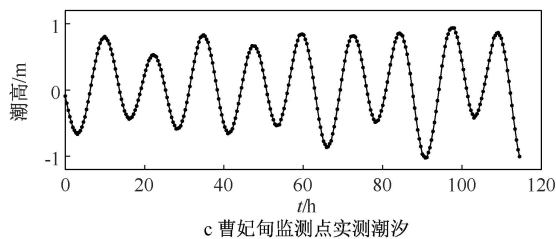
Fig. 8 Shut-in pressure build-up test data of Well A1



a 频率幅值关系曲线



b 根据识别分潮频率反推潮汐信号



c 曹妃甸监测点实测潮汐

图9 FFT频谱关系识别及反推潮汐曲线

Fig. 9 FFT spectrum identification and tide curve inversion

从图9a频率-幅值关系曲线可以看出,原始压力数据和实际潮汐数据的分潮频率和幅值对应关系几乎相同。原始压力数据频率-幅值曲线在最低频率位置幅值最高,其代表了压力恢复过程,周期大于潮汐频率。对原始压力的频率-幅值数据进行处理,两个分潮位置处幅值利用插值方法降为最低,再经过IFFT变换,得到消除潮汐后的压力数据(图10);处理前后压力导数数据对比如图11所示。可以看出,经过FFT变换方法操作后,得到的数据可以较准确的确定径向流位置,并判断后期存在储层物性变差或边界影响,结合对地质情况的认识,

判断解释结果与实际储层物性特征相符。

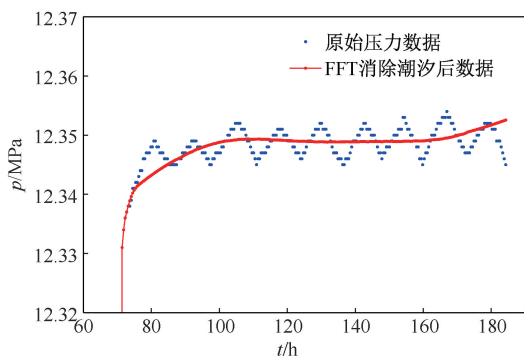


图 10 FFT 消除潮汐后数据

Fig. 10 Data after tide elimination by FFT

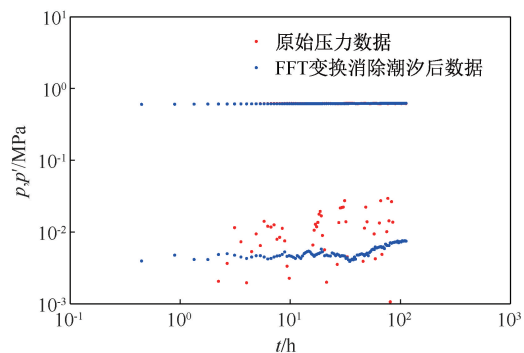


图 11 A1 井消除潮汐前后压力导数曲线对比

Fig. 11 Comparison of pressure derivative curves of Well A1 before and after tide elimination

3.2 A2 井测试

A2 井为渤海某预探井,油层中部斜深约 1 826 m,主要产层厚度 31 m,孔隙度 27%,井筒半径 0.089 m;原油体积系数 1.092,黏度 25 mPa·s,综合压缩系数 0.001 49 MPa⁻¹。2018 年对该井进行了 DST 测试,采取了“一开一关”的测试方式,测试管柱连接压力计托筒,内置存储式压力计,关井时间约 102 h,关井前产油量约 230 m³/d。关井前稳定流压 11.80 MPa,关井末期压力约 12.69 MPa,生产压差约 0.89 MPa。压力计数据潮汐效应明显(图 12)。波动周期约 12 h,波动幅度约 0.010 34 MPa。

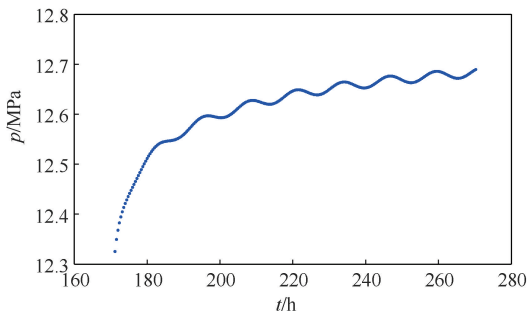
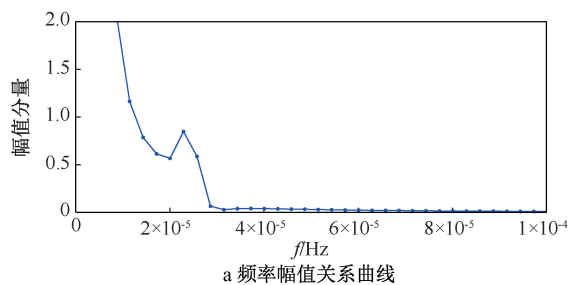


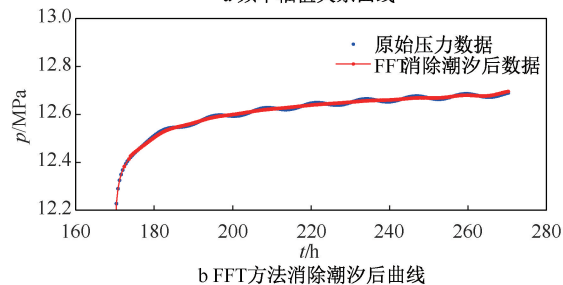
图 12 A2 井关井压力恢复测试数据

Fig. 12 Shut-in pressure build-up test data of Well A2

利用 FFT 变换方法得到 A2 井压力恢复数据的频率-幅值关系曲线(图 13a)。从频率-幅值关系曲线中能够分辨出 1/12 h 附近的频率,也就半日分潮,而全日分潮没有清晰分辨。同样,对原始压力的频率-幅值数据进行处理,分潮频率位置处幅值根据线性插值方法降为最低,再经过 IFFT 变换,得到消除潮汐后的压力数据(图 13b);处理前后压力导数数据对比如图 14 所示。



a 频率幅值关系曲线



b FFT方法消除潮汐后曲线

图 13 A2 井频率幅值关系曲线及消除潮汐前后压力导数曲线

Fig. 13 Frequency amplitude relationship and pressure derivative curve before and after tide elimination in Well A2

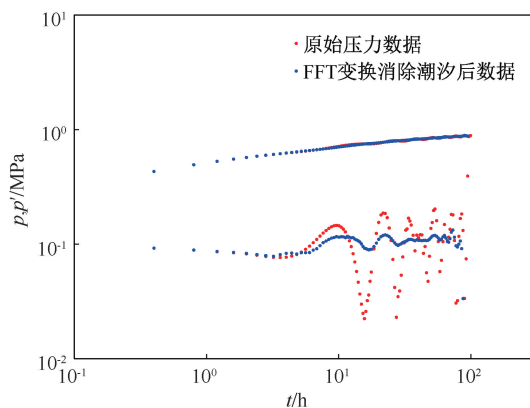


图 14 A2 井消除潮汐前后压力导数曲线对比

Fig. 14 Comparison of pressure derivative curves of Well A2 before and after tide elimination

从 FFT 变换方法前后的压力数据可以看出,大部分时间段的潮汐波动被消除,而且压力恢复在低频段的形态没有被改变;从压力导数数据可以看出,曲线在消除潮汐后,虽然中期还存在较小幅度的波动,但径向流位置可以非常准确的判断。

4 结论

(1)潮汐通常由多个固定周期的分潮组成,潮汐数据经过傅里叶变换后,各分潮可以分解成固定频率和幅值的对应关系。

(2)利用快速傅里叶变换,原始压力数据由时间域变换到频率域。噪声在相对高频区间出现;潮汐在各分潮固定频率出现;油藏储层物性变化引起的压力响应,则会在低频区间出现。

(3)含有潮汐的压力数据通过规整化处理,再采用快速傅里叶变换识别出潮汐频率,抑制该频率幅值,并通过快速傅里叶反变换,可以得到去除潮汐分量的原始数据。

(4)由于不同地层的压力响应不尽相同,一些含有储层信息的压力特征在经过FFT变换后,会在相对较高的频率出现,有时全日分潮的频率可能会被掩盖。

致谢:感谢中法渤海地质服务有限公司对本文发表的支持,并已通过单位保密审查。

参考文献

- [1] 孙达. 油气井压力恢复试井解释关键技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 73-77.
SUN Da. Key technologies for oil and gas well pressure buildup test interpretation [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 73-77.
- [2] 刘永红, 邓爱玲. 潮汐效应对 DST 测试资料的影响及校正技术研究[J]. 油气井测试, 2005, 14(5): 33-35.
LIU Yonghong, DENG Ailing. Influence of tidal action on DST testing data and its emendation tech study [J]. Well Testing, 2005, 14(5): 33-35.
- [3] 闫为格, 胡速, 刘宗昭. 潮汐对干扰试井的影响及校正[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(1): 49-53.
YAN Weige, HU Su, LIU Zongzhao. The effect and correction of the tide to interference testing result [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1996, 10(1): 49-53.
- [4] JULIEN H. Systematic use of tidal effects for reservoir appraisal and well integrity monitoring in a near-coast onshore environment [C]. SPE 191354, 2018.
- [5] MILAN L H, CHARLES B. Tidal effect in petroleum well testing [C]. SPE 14607, 1986.
- [6] PINILLA J F, TREVISAN O V, TINOCO F L. Coupling reservoir and geomechanics to interpret tidal effects in a well test [C]. SPE 38939, 1997.
- [7] ERIC C, ABBAS F. Tidal-force-influenced pressure transients for estimating compressibility in a fractured reservoir [C]. SPE 56437, 1999.
- [8] GOWTHAM T, ROUZBEH G M, VAMSI K B, et al. Possible misinterpretation in well test analysis due to unfiltered tidal signal [C]. SPE 180464, 2016.
- [9] LEVITAN M M, PHAN V. Identification of tidal signal in well test pressure data [C]. SPE 84376, 2003.
- [10] ZHAO Y, REYNOLDS A C. Estimation and removal of tidal effects from pressure data [C]. SPE 103253, 2009.
- [11] ACUNA J A. A simple method for the removal of tidal effects in pressure transient analysis [C]. SPE 180368, 2016.
- [12] 李元生, 杨志兴, 滕赛男, 等. 海上油气井试井解释潮汐效应消除方法[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 93-97.
LI Yuansheng, YANG Zhixing, TENG Sainan, et al. A removal method of tidal effect in offshore well test analysis [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 93-97.
- [13] FAIDOUZI M M. Contribution of tidal analysis to reservoir monitoring-field case study in a fractured reservoir offshore Abu Dhabi [C]. SPE 188837, 2017.
- [14] ARAUJO M A, CAMPOS W, MORENO R Z. Filtering of tide effects in formation evaluation data [C]. SPE 153566, 2012.
- [15] WU X, LING K, LIU D. Deepwater-reservoir characterization by use of tidal signal extracted from permanent downhole pressure gauge [C]. SPE 167656, 2013.
- [16] 何生平, 柳良仁, 谭习群, 等. 长庆油田水平井二流量试井数据去噪方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(4): 7-13.
HE Shengping, LIU Liangren, TAN Xiqun, et al. Denoising method for two-flow well testing data of horizontal wells in Changqing Oilfield [J]. Well Testing, 2019, 28(4): 7-13.
- [17] 罗丹, 刘浩. 渤海潮汐潮流的数值研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(3): 457-464.
LUO Dan, LIU Hao. Numerical study on the tides and tidal currents in the Bohai Sea [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(3): 457-464.
- [18] 赵保仁, 曹德明, 李徽翡, 等. 渤海的潮混合特征及潮汐峰现象[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 113-118.
ZHAO Baoren, CAO Deming, LI Huifei, et al. Tidal mixing characters and tidal fronts phenomenons in the Bohai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(4): 113-118.

编辑 穆立婷

第一作者简介:于伟强,男,1987年出生,硕士,工程师,2014年毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业,现主要从事井下压力测试数据解释和研究工作。电话:022-65310731, 18366269007; Email: yuwq@cfhg.com。通信地址:天津经济技术开发区信环西路19号天河科技园1号楼3层中法渤海地质服务有限公司,邮政编码:300457。