

基于 TMD 工具箱海上油气井试井解释潮汐效应消除方法

于伟强¹, 劳文韬², 李纪智³, 赵洪绪¹, 杨毅¹, 刘均荣²

1. 中法渤海地质服务有限公司 天津 300457
2. 中国石油大学(华东)石油工程学院 山东青岛 266580
3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广州深圳 518000

通讯作者: Email: yuwq@cfbc.com

项目支持: 中法渤海地质服务有限公司科研项目“潮汐效应对海上油气井试井解释影响及矫正方法研究”(CFB-TG-TI-2020-004)

引用: 于伟强, 劳文韬, 李纪智, 等. 基于 TMD 工具箱海上油气井试井解释潮汐效应消除方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(1): 62-68.

Cite: YU Weiqiang, LAO Wentao, LI Jizhi, et al. Tidal effect elimination method in well testing interpretation of offshore oil and gas wells based on TMD toolbox [J]. Well Testing, 2022, 31(1): 62-68.

摘要 海上油气井压力测试过程中, 潮汐效应产生的干扰压力会造成井底压力出现周期性波动, 影响流态识别和储层物性参数解释的准确性。利用 Tidal Modal Driver 工具箱, 实时预测海平面高度, 基于压力恢复过程中的双对数函数, 建立非线性最优化模型, 采用 Levenberg-Marquardt 算法求解潮汐影响系数和相位差, 消除井底压力测试数据中的潮汐效应影响。结果表明, 原始数据经过 TMD 工具箱过滤潮汐效应后, 压力曲线后期较平滑, 压力导数曲线后期波动明显减少, 地层渗流特征和边界特征比较明显, 更加真实地反映了地层特征, 矫正效果良好。该方法不需要测试海底压力数据作为参考信号, 仅过滤掉潮汐信号, 保留完整油藏信号, 为矫正含有潮汐效应的井底压力测试数据提供了有效手段。

关键词 潮汐效应; 不稳定试井; 试井解释; TMD 工具箱; 压力导数; 最优化模型

中图分类号: TE353 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.01.011

Tidal effect elimination method in well testing interpretation of offshore oil and gas wells based on TMD toolbox

YU Weiqiang¹, LAO Wentao², LI Jizhi³, ZHAO Hongxu¹, YANG Yi¹, LIU Junrong²

1. China-France Bohai Geoservices Co., Ltd., Tianjin 300457, China
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China
3. Shenzhen Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangzhou 518000, China

Abstract: During the pressure test of offshore oil and gas wells, the interference pressure caused by tidal effect will cause periodic fluctuation of bottomhole pressure, which will affect the accuracy of flow pattern identification and reservoir physical parameter interpretation. In this paper, the tidal modal driver toolbox is used to predict the sea level height in real time. Based on the double logarithmic function in the pressure buildup process, a nonlinear optimization model is established. The Levenberg-Marquardt algorithm is used to calculate the tidal influence coefficient and phase difference, so as to eliminate the tidal effect in the bottomhole pressure test data. The results show that after filtered by TMD toolbox, the pressure curve of the original data is smoother in the later stage, and the fluctuation of pressure derivative curve is significantly reduced obviously in the later stage, which can accurately identify the characteristics of radial flow stage and later stage. This method does not need to test the seabed pressure as the reference signal, it only filters out the tidal signal and then retains the complete reservoir signal, which provides an effective means to correct the bottomhole pressure test data containing tidal effect.

Keywords: tidal effect; unstable well test; well testing interpretation; TMD toolbox; pressure derivative; optimization model

海上潮汐效应在水文地质方面备受关注, 直到 20 世纪 70 年代到 80 年代, 随着高精度井下仪器的发展, 人们可以从井底压力中监测到潮汐效应造成的周期性波动^[1-2]。压力试井是监测油藏动态的重要手段, 其目的是通过油气井的压力测试资料来评

价油气井或油气藏的生产动态, 获取地层参数^[3-4]。海上油气田测试尤其是浅海地区测试, 潮汐作用对井底压力的影响往往是不可忽略的。1986 年, Hemala M L 等从油藏工程的角度分析了潮汐效应对井底压力的影响^[5]。他们将海平面高度与井底

压力曲线对比发现两者之间的波动周期相似,因此提出了根据潮汐效应获取油藏参数的可能性。为了通过压力曲线获取准确的油藏信息,需要从压力数据中过滤掉潮汐效应的影响。目前,井底压力潮汐效应过滤方法主要有两种:利用离散傅里叶变换(DFT)对压力数据进行处理,过滤掉指定频率的潮汐信号;建立非线性约束优化模型,利用最优化方法过滤潮汐信号。

DFT是应用最广泛的潮汐效应过滤方法^[6],可以将压力数据从时域转换到频域,然后从频域中过滤掉已知的潮汐组分,它是一种较为直接的方法^[7]。2012年,Araujo等研究指出,通过增大井底压力数据采集频率、延长测试时间、补样等操作,可以提高DFT变换后的频率精度,有效地避免快速傅里叶变换在处理离散数据时可能出现的误差^[8]。2013年,Wu X R等利用快速傅里叶变换过滤潮汐效应,并通过潮汐信号计算孔隙压缩系数、流体饱和度和,判断是否出现气侵^[9]。DFT因其选择性强特点,应用较为广泛,但在过滤潮汐组分的同时也会过滤油藏信号,往往使过滤效果较差。

海底压力波受地层阻尼作用的影响以一定的衰减系数和相位差传递到储层中。因此,井底压力信号是油藏信号与潮汐信号的叠加^[10]。一些学者发现,可以结合海洋潮汐数据或者引力势模型,利用最优化方法,求解衰减系数和相位差,从而过滤掉潮汐效应^[11]。1996年,闫为格等通过对比潮汐表和井底压力的波峰波谷,求取电子压力计所测得高潮(或低潮)与潮汐表中高潮(或低潮)之间的平均延时,以及每米潮差在井底产生的压力^[12]。2000年,Eric C等根据全引力势能模型实时计算太阳和月球造成的引力势,建立优化模型过滤潮汐效应,并提出根据优化模型结果可以进一步计算油藏压缩系数和流动系数^[13]。2003年,Levitan M M等以安装在海床上的仪表监测到的潮汐信为参考,利用三次样条插样方法和非线性最小二乘法来消除潮汐效应对试井解释的影响^[14]。2009年,Zhao Y等基于均质无限大油藏中油藏压力是关于时间的对数函数这一理论,利用最小二乘法求解海底压力变化,以及衰减系数和相位差,间接过滤潮汐效应^[15]。最优化方法可以有效地过滤潮汐效应,并且保留油藏的真实变化特征,但是该方法对潮汐表或者港口潮汐数据等参考信号依赖性很高。因此,采用最优化方法过滤潮汐效应时,需要获取准确的潮汐参考

信号。

本文基于TMD(Tidal Modal Driver)工具箱,建立非线性约束最优化模型,通过LM(Levenberg-Marquardt方法)求最优解,从而过滤掉压力数据中的潮汐效应。大多数潮汐效应矫正优化算法以海床上仪表监测到的海底压力为参考信号,通过单(双)对数函数拟合井底压力。TMD潮汐数据处理方法以TMD工具箱预测的潮汐压力为参考信号,不需要监测海洋潮汐信号,相比于传统的优化算法更简单快捷。

1 潮汐效应对试井解释影响

假定一口井以稳定产量 Q 生产了 t_p 时间,然后关井进行压力恢复测试。关井 t 时间后,井底压力为^[16]

$$p_{wf} = p_i + \frac{2.121QB\mu}{Kh} \left[-\lg\left(\frac{t_p + t}{t}\right) + \lg\left(\frac{Kt_p}{\phi\mu C_i r_w^2}\right) - 2.0923 + 0.8686S \right] \quad (1)$$

式中: p_i 为关井时刻井底压力,MPa; Q 为产液量, m^3/h ; B 为流体体积系数,无因次; μ 为流体黏度, $mPa\cdot s$; K 为地层渗透率,mD; h 为储层厚度,m; ϕ 为地层孔隙度,%; C_i 为地层综合压缩系数, MPa^{-1} ; r_w 为井筒半径,m; S 为表皮系数,无因次; t_p 为开井生产时间,h; t 为关井时间,h。

关井恢复过程中,压力的对数导数为

$$\frac{dp_{wf}}{d\ln t} = t \frac{dp_{wf}}{dt} = t \left[\frac{2.121QB\mu}{Kh} \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_p + t} \right) \right] \quad (2)$$

潮汐压力为多组正弦信号的叠加,假设海底潮汐压力为

$$p_{tide} = \sum_{k=1}^n [\alpha_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) + \beta_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)] \quad (3)$$

式中: p_{tide} 为海底潮汐压力,MPa; n 为潮汐组分数目; ω_k 为潮汐频率,Hz; φ_k 为初始相位,弧度; α_k, β_k 分别为余弦分量振幅和正弦分量振幅,MPa。

潮汐压力波向地层传递过程中,受地层阻尼作用的影响,井底潮汐压力波与海底潮汐压力波相比,其振幅会减小,并存在时间差。设其振幅衰减系数为 α ,延迟时间为 t_b ,受潮汐作用影响的井底压力表示为

$$\begin{aligned} p(t) &= p_{wf}(t) + \alpha p_{tide}(t + t_b) \\ &= p_i + \frac{2.121QB\mu}{Kh} \left[-\lg\left(\frac{t_p + t}{t}\right) + \lg\left(\frac{Kt_p}{\phi\mu C_i r_w^2}\right) - 2.0923 + 0.8686S \right] + \end{aligned}$$

$$\alpha \sum_{k=1}^n [\alpha_k \cos(\omega_k t + \phi_k + t_b) + \beta_k \sin(\omega_k t + \phi_k + t_b)] \quad (4)$$

受潮汐作用影响的井底压力的对数导数为

$$\frac{dp}{d \ln t} = t \frac{dp}{dt} = t \left\{ \frac{2.121 QB\mu}{Kh} \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_p + t} \right) + \alpha \sum_{k=1}^n \omega_k [-\alpha_k \sin(\omega_k t + \phi_k + t_b) + \beta_k \cos(\omega_k t + \phi_k + t_b)] \right\} \quad (5)$$

压力恢复初期(一般在关井1 h以内),井底压力变化幅度较大,潮汐压力波动很小,双对数曲线几乎不受潮汐信号影响。在关井后期,井底压力趋于平缓,边界效应开始出现,此时潮汐压力不能忽略。根据(5)式所示,随着关井时间增大,对数导数曲线上潮汐效应越来越明显。因此,通常情况下,压力的双对数曲线末端会出现非常强烈的波动,难以判断油藏边界类型、获取油藏参数。图1为模拟的一组井底压力数据,关井时刻分别处在高、低潮时,在不同的潮汐压差影响下的双对数曲线。

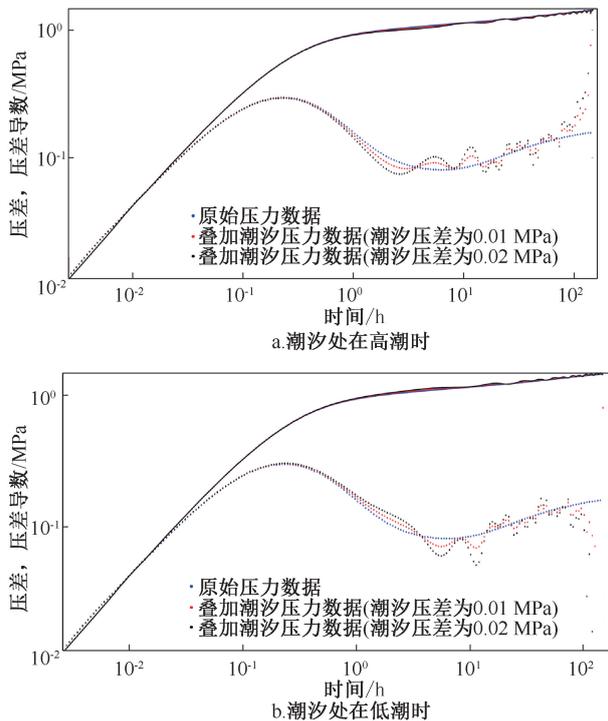


图1 关井时刻潮汐效应对双对数曲线的影响

Fig. 1 Influence of tidal effect on double logarithmic curve at shut in time

关井早期曲线不受潮汐效应影响,但是后期数据点随着时间分布越来越离散,且潮汐压差越大,波动越明显;另外,对比图1可以看出,关井时刻潮汐处在高潮时和低潮时,曲线形态也有明显差别。

2 TMD 工具箱

在已知某位置经纬度坐标和当地时间的条件下,利用TMD工具箱可以得到该位置该时刻的潮高^[17],从而得到海底潮汐压力。该工具箱基于全球潮汐模型数据,通过求解圣维南偏微分方程组得到海面高度。圣维南方程组描述的不稳定水流运动是一种水中动力波传播现象,水流运动的主要作用是重力。因此,属于重力波的范畴。圣维南方程组包括连续方程和运动方程,属于拟线性双曲型偏微分方程组,即

$$\frac{\partial U}{\partial t} + f \hat{z} U + g \cdot H \nabla (\xi - \xi_{\text{SAL}}) + F = f_0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = - \nabla \cdot U \quad (7)$$

其中 $F = (r/H)U$

式中: ξ 为海面海拔高度,m; U 为体积运移向量(其值等于速度向量与水深的积), m^2/s ; f 为科里奥利参数; \hat{z} 为重力方向单位向量; F 为摩擦应力,Pa; r 为海底摩擦系数; f_0 为潮汐引力,N; ξ_{SAL} 为潮汐载荷,Pa; H 为海水深度,m。

连续方程式(6)表示,过水断面的面积随时间的变化率与流量随位置的变化率之和为零;运动方程式(7)表示,势能沿程的改变用于克服阻力和转化为加速度而做的功。结合初始条件和边界条件,就可得出不稳定水流的流速与水深随流程和时间的变化^[18]。初始条件为某一起始时刻的水流状态,边界条件为所计算水体的边界水流状态。

采用不等距隐式有限差分法求解方程,将所计算的水体按照一定的网格划分。在每个网格点处,将微分形式的圣维南方程组和边界条件转换为有限差分形式后,逐时段地求解差分方程组,得出各网格点(如断面)处的水深及流速。求解过程中包括正演模型和反演模型,前者求解基于天体力作用下的圣维南方程组的数值解,后者基于已有的潮汐数据求解正演模型中的数值解。

3 潮汐效应消除方法

油气井压力恢复测试过程中,井底压力与关井时间满足双对数关系,如(1)式所示。将(1)式简化,得到:

$$p_{\text{wf}} = a + b \lg[(t - c)/t] \quad (8)$$

式中: a, b, c 分别为常数。

潮汐现象引起的海底压力波动向储层传递过

程中,受地层阻尼作用的影响,压力波动的振幅会减小,并存在相位差。1940年, Jacob C. E. 将潮汐效应引起的井底压力振幅与海底压力振幅的比值定义为潮汐影响系数^[19]。于是,潮汐效应影响下的井底压力可以通过下式表示,即

$$p = a + b \lg \frac{t - c}{t} + TE \times p_{\text{tide}}(t + LAG) \quad (9)$$

式中: TE 为潮汐影响系数,无量纲; LAG 为时间差, h。

上述(9)式为潮汐效应影响下的理论井底压力,在获得实测压力数据后,建立优化模型求解未知参数。目标函数为

$$O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_{\text{actual}}(i) - p(t_i)]^2 \quad (10)$$

式中: N 为实测压力数据数量; p_{actual} 为实测压力, MPa。

Levenberg-Marquardt 方法(LM 算法)是高斯牛顿法和梯度下降法的结合^[20]。梯度下降法沿着反梯度方向进行迭代,不断寻找极小值,直到梯度的模达到预设的要求;高斯牛顿法利用目标函数的泰勒展开式,把非线性函数最小二乘化问题转化为每次迭代的线性函数最小二乘化问题。LM 算法在高斯牛顿法中加入了阻尼系数 λ 。当 λ 较大时,相当于梯度下降法; λ 较小时,相当于高斯牛顿法。LM 算法关键是用模型函数对待估参数向量在其领域内做线性近似,忽略掉二阶以上的导数项,从而将非线性优化模型转化为线性最小二乘问题。通过 LM 算法,计算得到未知参数 a, b, c, TE, LAG 后,利用下式可得到过滤潮汐效应后的压力数据,即

$$p_{\text{filter}} = p_{\text{actual}}(t) - TE \times p_{\text{tide}}(t + LAG) \quad (11)$$

基于 TMD 工具箱的消除潮汐效应影响的步骤为:(1)对压力数据进行预处理,获取待处理关井段压力 p_{actual} ; (2)通过 TMD 工具箱预测潮汐压力,利用线性插值方法构造“时间—潮汐压力”函数 $p_{\text{tide}}(t)$; (3)根据(9)式、(10)式建立单(双)对数优化模型,通过 LM 优化算法求解 a, b, c, TE, LAG ; (4)根据(11)式获得过滤潮汐效应后的压力数据。

为了对比 TMD 方法与 DFT 方法消除潮汐效应的效果,通过试井软件建立径向复合无限大油藏模型,得到关井恢复过程压力,叠加一组 TMD 预测的潮汐压力后,模拟生成一组受潮汐效应影响的压力测试数据(图2)。从图2中可以看出,关井早期压力上升幅度较大,潮汐效应不明显;随着

井底压力增幅减小,潮汐效应造成的压力波动越来越明显。

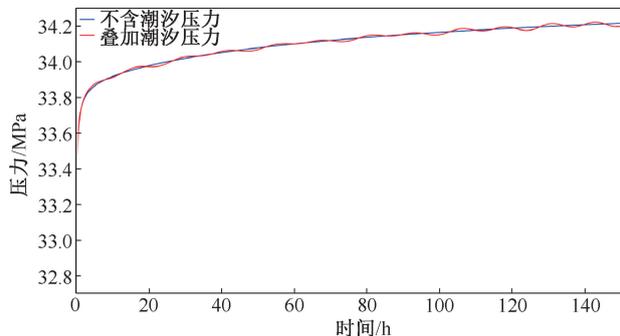


图2 模拟压力曲线

Fig. 2 Simulated pressure curve

利用 DFT 方法和 TMD 方法,对模拟叠加潮汐效应的压力数据进行处理,结果如图3所示。从图3中可以看出,叠加潮汐效应前,曲线光滑,中后期曲线形态明显;叠加潮汐效应后的压力导数中后期波动明显,后期曲线的上翘形态也被掩盖,难以确定径向流水平直线的准确位置,甚至影响解释模型的判断。经 DFT 方法处理后,曲线中后期仍存在波动,过滤效果较差。采用 TMD 方法处理后,曲线后期波动明显减少,曲线的径向流水平段和曲线后期上翘形态能够准确识别,与叠加潮汐效应前的双对数曲线形态一致,说明过滤效果良好。从模拟压力恢复叠加潮汐数据的处理结果可以看出,本文提出的优化算法可以准确识别并消除潮汐效应。

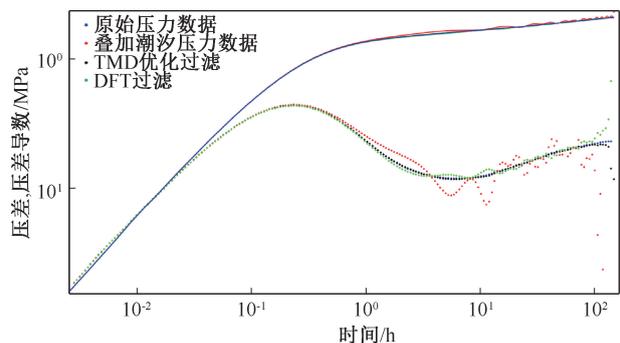


图3 利用 TMD 和 DFT 方法处理后的模拟压力双对数图
Fig. 3 Double logarithmic diagram of simulated pressure processed by TMD and DFT methods

4 应用实例

以南海两口受潮汐影响的测试井为例,通过本文提出的优化算法对原始数据进行处理。

A 井为南海某区块一口生产井,水深 124 m。从构造图中可以看出距离该井约 200~400 m 范围

内有多条断层。通过测压工具串组合将电子压力计下入深度为 1 725.0 m 的油层,作业过程持续时间约为 120 h,关井恢复时间为 70 h。压力恢复过程压力曲线如图 4a 所示,关井起始时刻压力为 12.62 MPa,关井结束时刻压力为 16.01 MPa,生产压差约为 3.38 MPa。可以看出,关井早期压力急剧上升;油藏压力稳定后,潮汐效应明显,压力曲线波动振幅约为 0.001 4 MPa,波动周期约为 24 h。绘制原始压力双对数曲线如图 4b 所示,潮汐效应明显,难以判断油藏类型,特别是曲线后期波动幅度较大,无法判断外边界类型。

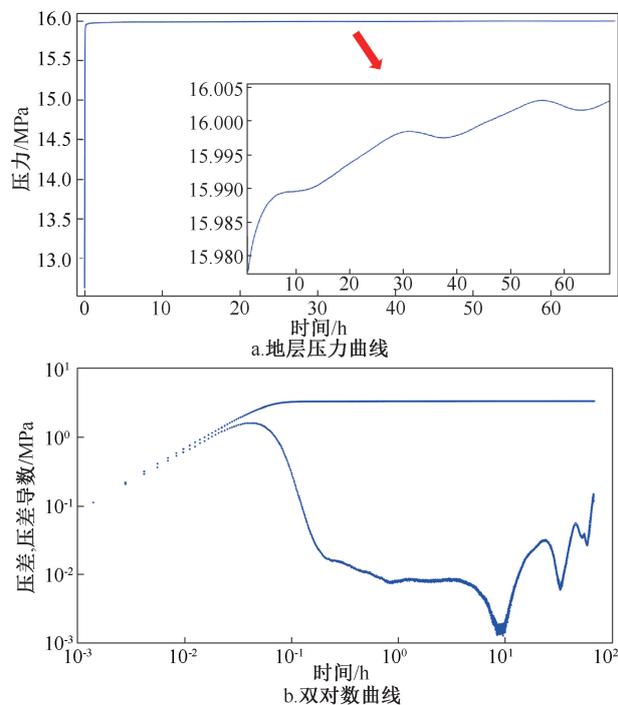


图 4 A 井原始地层压力及双对数曲线

Fig. 4 Formation pressure and double logarithmic curves of Well A

通过 TMD 优化算法求得潮汐影响系数为 0.289,相位差为 8.42 h;根据(11)式得到过滤潮汐效应后的压力。TMD 处理和 DFT 处理后的压力曲线如图 5a 所示,双对数曲线如图 5b 所示。TMD 处理后压力曲线波动明显减少,DFT 处理后,仍存在较大波动。处理后的双对数曲线(图 5b)相比于原始双对数曲线(图 4b),中后期上下波动均明显减少。TMD 处理后,曲线末端光滑且上升趋势明显;DFT 处理后,曲线末端仍存在较大波动。

TMD 处理后,压力导数曲线中期出现明显径向流水平段;后期曲线上翘趋势明显。对潮汐矫正前后的数据进行试井解释,结果见表 1。

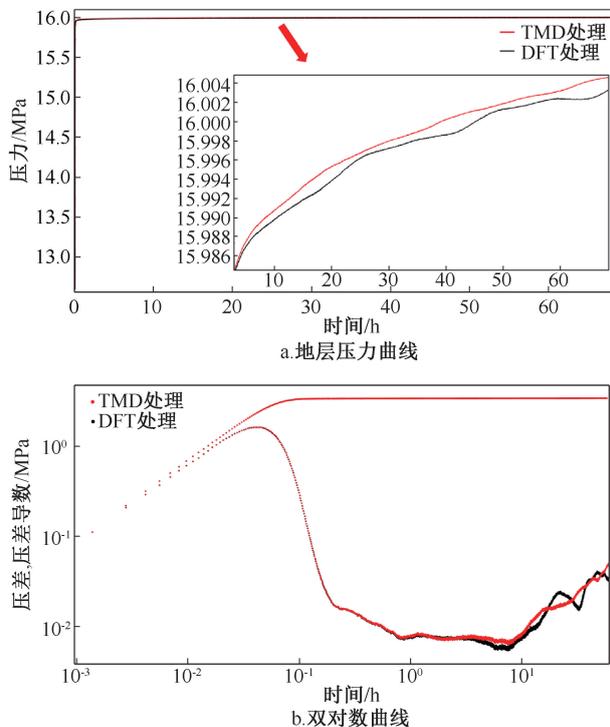


图 5 A 井过滤潮汐效应后地层压力及双对数曲线
Fig. 5 Formation pressure and double logarithmic curves after filtration of tidal effect in Well A

表 1 A 井试井解释结果

Table 1 List of well test interpretation results of Well A

项目	地层压力/ MPa	表皮系数	井储系数/ ($\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$)	渗透率/ mD
原始数据	16.05	7.15	0.68	9.45
DFT 处理	16.07	7.86	0.68	10.21
TMD 处理	16.12	7.35	0.68	9.79

注:解释选择均质油藏模型;TMD 处理后,边界特征显示为 2~3 条断层,且边界距离 212 m。

由表 1 可看出,地层压力、表皮系数和渗透率解释结果均相近,其原因是潮汐效应对压力恢复早期的影响不明显;压力恢复后期,潮汐效应影响显著,原始数据和 DFT 处理后双对数曲线波动较大,地层渗流特征不明显;TMD 处理后双对数曲线后期地层渗流特征和边界特征比较明显,能够判断井位远端存在 2~3 条不渗透边界,与构造图边界数量和距离相近。原始数据通过 TMD 方法的处理,能够消除地层参数多解性,矫正效果较好,更加真实地反映地层特征。

B 井为南海某区块一口生产井,水深 118 m。通过测压工具串组合将电子压力计下入深度为 1 190.0 m 的油层,作业过程持续时间约为 150 h,关井恢复时间为 70 h。压力恢复过程压力曲线如图 6a 所示,关井起始时刻压力为 5.58 MPa,关井结束时刻压力为 8.13 MPa,生产压差约为 2.55 MPa。

从图中可以看出,关井早期压力急剧上升;油藏压力稳定后,潮汐效应明显,压力曲线波动振幅约为 0.0021 MPa,波动周期约为 12 h。绘制原始压力双对数曲线如图 6b 所示。从图中对数导数曲线可以看出,在压力恢复早期(0.1~1.0 h),出现较大波动,推断该现象为油藏信号;中期出现了非常明显的拟径向流水平段;后期曲线有上升趋势,但波动较大,潮汐效应明显。

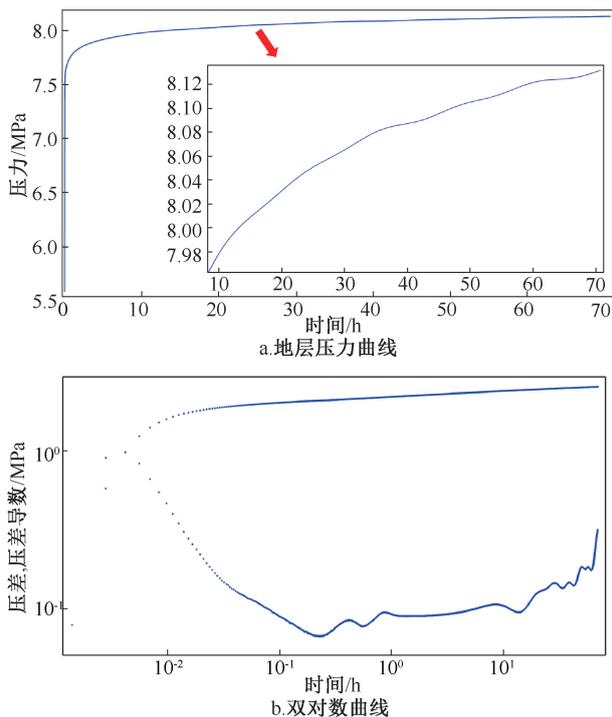


图 6 B 井原始地层压力及双对数曲线
Fig. 6 Formation pressure and double logarithmic curves of Well B

通过优化算法求得潮汐影响系数为 0.275,相位差为 7.57 h。根据(11)式得到过滤潮汐效应后的压力。TMD 处理和 DFT 处理后的压力曲线如图 7a 所示,压力曲线波动明显减少;双对数曲线如图 7b 所示,中后期上下波动均明显减少,但 DFT 处理后压力导数曲线仍存在较小波动。

潮汐效应矫正后的双对数导数曲线后期波动明显减少,曲线光滑;过渡段之后(0.1~1.0 h)出现了“凹子”形态,可能受到测试层位纵向上非均质特征影响,结合测井解释结果,显示储层纵向上存在多个小层,且物性参数差别较大,判断油藏为双重渗透率模型;中期出现了非常明显的拟径向流水平段;后期曲线上翘趋势明显,与构造图中条带状油藏特征相对应。对潮汐矫正前后的数据分别进行了试井解释,结果见表 2。

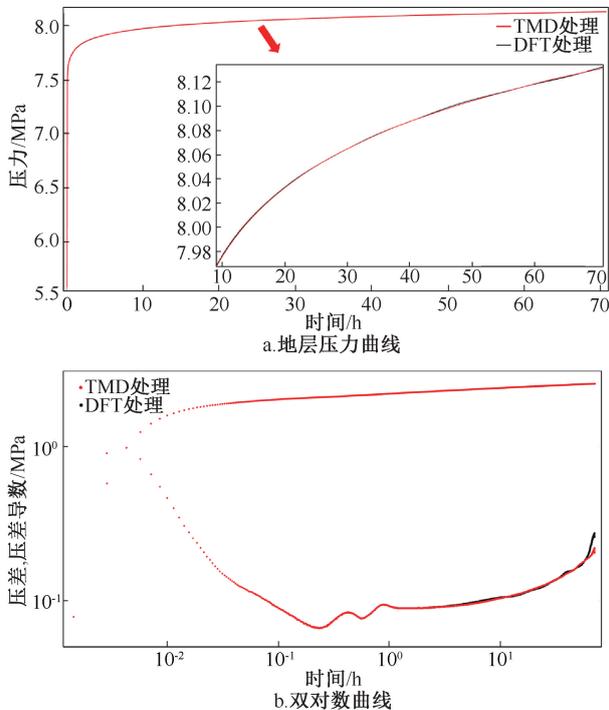


图 7 B 井过滤潮汐效应后地层压力及双对数曲线
Fig. 7 Formation pressure double logarithmic curves after filtration of tidal effect in Well B

表 2 B 井试井解释结果

Table 2 List of well test interpretation results of Well B

项目	地层压力/ MPa	表皮系数	井储系数/ (m ³ ·MPa ⁻¹)	渗透率/ mD
原始数据	8.30	3.82	0.37	23.24
DFT 处理	8.26	4.07	0.38	23.57
TMD 处理	8.23	4.11	0.38	23.79

注:解释选择双渗油藏模型;DFT 和 TMD 处理后,边界特征均显示 2 条平行边界。

压力恢复后期,潮汐效应影响显著,原始数据双对数曲线波动较大,地层渗流特征不明显;DFT 和 TMD 处理后双对数曲线上地层渗流特征和边界特征比较明显,能够消除地层参数多解性,但前者双对数曲线后期仍存在波动。因此,TMD 矫正效果更好,试井解释结果更符合实际的地质认识。

A、B 两口井压力经 TMD 矫正后,双对数曲线后期波动明显减少,说明大部分潮汐波动已经被过滤掉;DFT 矫正后,导数曲线上仍存在波动。因此,TMD 处理效果优于 DFT 处理。基于 TMD 工具箱的潮汐效应矫正方法可以有效地过滤掉海上压力恢复测试过程中的潮汐信号并保留油藏信号。

5 结论

(1) 压力恢复初期,井底压力变化幅度较大,潮汐效应造成的压力波动可以忽略,对数导数曲线形态

受潮汐效应影响小;压力恢复后期,井底压力趋于平缓,潮汐压力造成对数导数曲线波动较大,必须去除潮汐效应影响才能获取真实储层参数和特征。

(2)建立了一种海上油气井试井解释中潮汐效应消除方法。该方法通过TMD方法预测潮汐压力,结合单(双)对数非线性优化模型,利用LM算法进行优化求解,从而消除压力数据中的潮汐效应。该方法基于关井恢复过程中压力与时间满足单(双)对数关系来建立优化模型,因此仅适用于处理压力恢复过程中的潮汐效应。

(3)实例结果表明,本文提出的方法可以快速、有效地将潮汐效应从压力恢复曲线中剥离,消除潮汐效应的影响并保留真实信号,从而准确判断油藏模型、计算储层物性参数、提高测试资料利用价值。

(4)本文方法主要解决潮汐效应引起的压力波动问题,但由于测试过程中的复杂性,当存在其它因素引起的压力波动时,叠加的信号会增加真实信号提取的难度,TMD方法能否有效过滤该类叠加信号还有待进一步研究。

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] ARDITTY P C, RAMEY H J, NUR A M. Response of a closed well-reservoir system to stress induced by earth tides [J]. SPE Reprint Series, 2004,57(2):414-428.
- [2] WITHERSPOON P A, NARASIMHAN T N, MCEDWARDS D G. Results of interference tests from two geothermal reservoirs [J]. Journal of Petroleum Technology, 1976,30(1):10-16.
- [3] 胡效青. 东坪基岩气藏试井监测设计技术优化[J]. 油气井测试,2016,25(5):20-23.
HU Xiaoqing. Technical optimization of well testing monitoring design for the Dongping rock gas reservoir [J]. Well Testing, 2016,25(5):20-23.
- [4] 王峻岭. 生产测井与试井联合作业技术[J]. 油气井测试,2021,30(2):51-55.
WANG Junling. Combined operation technology of production logging and well testing [J]. Well Testing, 2021,30(2):51-55.
- [5] HEMALA M L, BALNAVES C. Tidal effect in petroleum well testing [C]. SPE 14607, 1986.
- [6] ACUNA J A. A simple method for the removal of tidal effects in pressure transient analysis [C]. SPE 180368, 2016.
- [7] 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.
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.

- [8] ARAUJO M A R D, CAMPOS W, MORENO R Z. Filtering of tide effects in formation evaluation data [C]. SPE 153566, 2012.
- [9] WU Xingru, LING Kegang, LIU Dexin. Deepwater reservoir characterisation using tidal signal extracted from permanent downhole pressure gauge [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2013,16(4):390-400.
- [10] SANTOS J E. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Esaim Mathematical Modelling & Numerical Analysis, 1986,20(1):50-49.
- [11] FAIDOUZI M M. Contribution of tidal analysis to reservoir monitoring-field case study in a fractured reservoir offshore Abu Dhabi [C]. SPE 188837, 2017.
- [12] 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.
- [13] ERIC C, ABBAS F. Gravitational potential variations of the sun and moon for estimation of reservoir compressibility [C]. SPE 67952, 2000.
- [14] LEVITAN M M, PHAN V. Identification of tidal signal in well test pressure data [C]. SPE 84376, 2003.
- [15] ZHAO Yong, REYNOLDS A C. Estimation and removal of tidal effects from pressure data [C]. SPE Journal, 2009,14(1):144-152.
- [16] 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.
- [17] AUGUSTO P D O E, JUNQUEIRA C P. On the use of ocean tide model driver, TMD, as a filter to recover reservoir signal from well test pressure history [C]. OTC 28020, 2017.
- [18] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2002,19(2):183-204.
- [19] JACOB C E. On the flow of water in an elastic artesian aquifer [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1940,21(2):574-586.
- [20] WILAMOWSKI B M, YU H. Improved computation for levenberg-marquardt training [J]. IEEE transactions on neural networks, 2010,21(6):930-937.

编辑 王军

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;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。