

文章编号: 0253-2697(2018)03-0327-08 DOI:10.7623/syxb201803008

# 基于二阶 B 样条的 ILK 流量反褶积算法改进及应用

刘文超<sup>1,2</sup> 刘曰武<sup>2</sup> 朱维耀<sup>1</sup> 孙贺东<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院 北京 100083;

2. 中国科学院力学研究所 北京 100190; 3. 中国石油勘探开发研究院气田开发研究所 河北廊坊 065007)

**摘要:**受 ILK 压力反褶积算法压力计算精度高的启发,基于一个等价的褶积积分方程,改用流量数据代替原算法所采用的累积流量数据进行反褶积计算,并给出了反褶积算法的快速求解方法。利用褶积积分的数学性质,采用按照压力降落段进行分段积分的方法,快速地解析求解反褶积计算过程中的敏感性矩阵;同时利用二分法快速查找每组流量数据点所属的压力降落段,进一步提高了计算效率。通过理论算例和实际算例的测试分析表明,改进后的 ILK 流量反褶积算法具有更高的计算精度,尤其使初始和后期阶段的流量数据精度有了较大提高,实际算例的计算结果更加符合单位井底压力降下的流量递减变化规律。与原算法相比,改进算法在产量递减分析时可以获得更长的表征拟稳态流的特征直线段,显著提高了数据的拟合效果,也具备较高的计算速度、稳定性及实用性。因此,将该反褶积算法应用于产量递减分析不仅可以有效降低数据误差影响的敏感性,还可以获得更多的数据信息量,提高数据的拟合效果,降低解释结果的不确定性。

**关键词:**反褶积;产量递减分析;二阶 B 样条;最小二乘法;生产数据

中图分类号:TE319

文献标识码:A

## Improvement and application of ILK flow-rate deconvolution algorithm based on the second-order B-splines

Liu Wenchao<sup>1,2</sup> Liu Yuewu<sup>2</sup> Zhu Weiyao<sup>1</sup> Sun Hedong<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Department of Gas Field Development, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Hebei Langfang 065007, China)

**Abstract:** Inspired by the high-accuracy pressure calculation of ILK production-pressure deconvolution algorithm and based on an equivalent convolution integral equation, the intrinsic accumulative flow data were replaced by flow rate data to carry out the deconvolution calculation. Meanwhile, the fast solution method of deconvolution algorithm was also presented. Using the mathematical property of deconvolution integral, a method of subsection integral was adopted according to the pressure decline segments, so as to quickly analytically solve the sensitivity matrix in deconvolution calculation. Simultaneously, the dichotomy was also applied to quickly search for the pressure decline segment at the data point of each flow rate set, further improving the calculation efficiency. In-depth analyses on theoretical and actual case tests indicate that the improved ILK flow-rate deconvolution algorithm has higher calculation accuracy; especially in the initial and the later periods, the accuracy of flow rate data has been largely improved; the calculation results for actual cases are more consistent with the production rate decline laws corresponding to the unit wellbore pressure drop. In contrast with the original algorithm, the longer characteristic line segments for representing quasi-steady state flow can be gained when analyzing the production decline, obviously improving the data fitting effect. The improved algorithm also exhibits very high calculation speed, good stability and practicability. Therefore, the application of this deconvolution algorithm to production decline analysis can not only effectively reduce the sensibility influenced by data errors, but also acquire more data information, improving data fitting effects and reducing the uncertainty of interpretation results.

**Key words:** deconvolution; production decline analysis; second-order B-splines; the least square method; production data

引用:刘文超,刘曰武,朱维耀,孙贺东.基于二阶 B 样条的 ILK 流量反褶积算法改进及应用[J].石油学报,2018,39(3):327-334.

Cite:LIU Wenchao, LIU Yuewu, ZHU Weiyao, SUN Hedong. Improvement and application of ILK flow-rate deconvolution algorithm based on the second-order B-splines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(3): 327-334.

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05038-003, 2011ZX05046-03)、国家自然科学基金项目(No. 51404232)和中央高校基本科研业务费专项基金项目(FRF-TP-17-023A1)资助。

第一作者及通信作者:刘文超,男,1984年8月生,2007年获中国石油大学(华东)学士学位,2013年获中国石油大学(华东)博士学位,现为北京科技大学土木与资源工程学院讲师,主要从事渗流力学及工程应用方面的教学及研究工作。Email:wcliu\_2008@126.com

## 1 问题的提出

在达西渗流线性系统中,基于 Duhamel 原理<sup>[1-4]</sup>的反褶积首先被应用于试井<sup>[5]</sup>解释的压力瞬时分析中,可将变流量  $q$  下的瞬时压力数据  $p$  转换为单位流量下的瞬时压力数据响应  $p_u$ ,所采用的统一褶积方程<sup>[1-4]</sup>为:

$$p_{ini} - p(t) = \int_0^t q(t-\tau) p'_u(\tau) d\tau \quad (1)$$

目前,较为成熟且稳定的试井反褶积算法主要包括 Von Schroeter 算法<sup>[6]</sup>、Levitan 算法<sup>[7-9]</sup>、ILK 算法<sup>[10]</sup>及其改进算法<sup>[11-15]</sup>。Von Schroeter 算法和 Levitan 算法<sup>[6-9]</sup>均基于褶积方程式(1),通过建立非线性的加权最小二乘目标函数来重建压力导数响应  $p'_u$ ,这2种方法均已加入 Ecrin 软件中。ILK 算法<sup>[10]</sup>则通过二阶 B 样条函数的权重和来表示式(1)中的压力导数响应  $p'_u$ ,经积分后可得  $p_u$ 。Liu 等<sup>[13]</sup>还通过解析方法对 ILK 压力反褶积算法<sup>[10]</sup>进行了改进,提高了计算速度,并发现基于褶积方程式(1)的 ILK 算法在计算  $p_u$  时有较高的计算精度和稳定性。

基于 Duhamel 原理,反褶积还可将变井底压力降  $\Delta p_{wf}$  下的瞬时流量数据  $q$  转换为单位井底压力降下的瞬时流量数据响应  $q_u$ ,褶积方程可表示为<sup>[1,16]</sup>:

$$q(t) = \int_0^t \Delta p'_{wf}(\tau) q_u(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

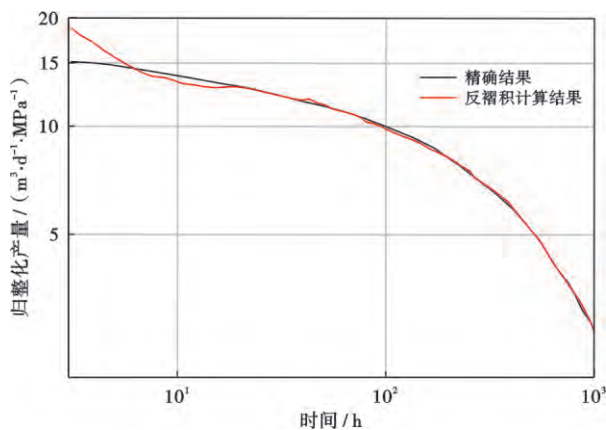


图1 反褶积计算结果验证<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Verification of deconvolution computation results<sup>[16]</sup>

因此,反褶积也被应用于产量递减分析<sup>[17-19]</sup>中,但仅有 Kuchuk, Ilk 以及 Zheng 等<sup>[16,20-21]</sup>在这方面进行了研究。Kuchuk 等<sup>[16]</sup>仿照 Von Schroeter 计算单位流量下井底压力的反褶积算法,基于褶积方程式(2),建立了非线性的加权最小二乘目标函数来优化求解  $q_u$ ;然而该算法精度不高,计算得到的  $q_u$  在初始阶段数据误差较大(图1),会造成产量递减分析时特征参数数据发散,不利于特征曲线的拟合。

$$N_p(t) = \int_0^t \Delta p_{wf}(t-\tau) q_u(\tau) d\tau \quad (3)$$

鉴于褶积积分的性质,褶积方程具有不同的等价形式。ILK 等<sup>[20]</sup>基于褶积方程式(2)的等价式(3),利用累积流量数据  $N_p$ ,将流量  $q_u$  利用二阶 B 样条函数的权重和来表示,由此建立了流量反褶积算法;然而该算法也同样存在初始阶段误差较大的问题(图4)。Zheng 等<sup>[21]</sup>虽将反褶积应用于数值模拟算例的产量递减分析中,但未给出反褶积算法的具体实现过程。

综上所述,相对于应用于试井解释中的压力反褶积算法采用了统一的褶积方程式(1),应用于产量递减分析的各流量反褶积算法则采用了不同的等价褶积方程,而褶积方程的选取会对流量反褶积计算精度产生影响。初始阶段单位压差下流量数据会对产量递减分析特征参数数据的计算产生较大影响;但该阶段的流量变化剧烈,为了获得初始阶段流量的正确计算结果,反褶积算法应具有高精度。鉴于当前流量反褶积算法精度不高<sup>[16,20]</sup>的问题,笔者对 ILK 流量反褶积算法<sup>[20]</sup>进行了改进。通过对 ILK 压力反褶积算法<sup>[13]</sup>的研究发现:ILK 压力反褶积算法<sup>[10,13]</sup>计算出的  $p'_u$ ,在经积分后获得的流量归一化瞬时压力  $p_u$  具有很高的计算精度和稳定性。将式(3)等式两边求导后,可得一等价的褶积方程式:

$$q(t) = \int_0^t \Delta p_{wf}(t-\tau) q'_u(\tau) d\tau \quad (4)$$

可以看出,式(4)和式(1)具有相同的形式;基于褶积方程式(4),将  $q'_u$  利用二阶 B 样条函数权重和来表示,并建立流量反褶积算法,在获取  $q_u$  时会具有更高精度。

## 2 ILK 流量反褶积算法的改进与建立

### 2.1 改进方法

可以证明式(3)和式(4)的等价性<sup>[22]</sup>。ILK 等<sup>[20]</sup>基于褶积方程式(3)建立了流量反褶积算法,采用二阶 B 样条函数线性组合表示式(3)中单位井底压力降下的流量响应函数  $q_u$ :

$$q_u(\tau) = \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(\tau) \quad (5)$$

ILK 等<sup>[20]</sup>基于式(3)所建立的流量反褶积算法精度不高。为了提高计算精度,笔者基于与式(3)等价的褶积方程式(4)对 ILK 流量反褶积算法进行改进,改用二阶 B 样条函数的线性组合来表示式(4)中单位压降下的流量导数响应函数  $q'_u$ :

$$q'_u(\tau) = \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(\tau) \quad (6)$$

其中,二阶 B 样条基数值选取<sup>[10,13]</sup>应保证每个对数循

环至少包含 2~6 个结点。将式(6)代入式(4),可得:

$$q(t) = \sum_{i=1}^u c_i \int_0^t \Delta p_{wf}(\tau) B_i^2(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

将流量数据  $q$  和对应压力数据  $\Delta p_{wf}$  代入式(7)即可产生关于待定系数  $c_i$  的主线性方程组。ILK 流量反褶积算法改进前后的对比见表 1。

表 1 ILK 算法与改进算法的对比

Table 1 Comparison between ILK algorithm and its improved algorithm

流量反褶积算法	基于的褶积积分方程	利用二阶 B 样条权重和的表示方法	计算所需数据
ILK 算法	$N_p(t) = \int_0^t \Delta p_{wf}(t-\tau) q_u(\tau) d\tau$	$q_u(\tau) = \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(\tau)$	累积流量数据 $N_p(t)$ 和压力数据 $p_{wf}$
改进的 ILK 算法	$q(t) = \int_0^t \Delta p_{wf}(t-\tau) q'_u(\tau) d\tau$	$q'_u(\tau) = \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(\tau)$	流量数据 $q(t)$ 和压力数据 $p_{wf}$

### 2.2 算法的快速解析求解方法

假定连续测试了对应  $m$  个井底压力降  $\Delta p_{wf}^j$  ( $j = 0, 1, \dots, m-1$ ) 的油井流量数据,  $\Delta p_{wf}^j$  所在的时间域为  $[t_j, t_{j+1}), [t_j, t_{j+1})$  内对应  $n_j$  个按时间递增的有效瞬时流量观测数据点  $(t_k^j, q_k^j)$  ( $k=0, \dots, n_j-1$ ); 其中,  $t_0^j = t_j$ 。将所有  $n_j \cdot m$  个有效流量数据点分别代入式(7), 可以得到一个关于待定系数  $\{c_i, i=1, 2, \dots, u\}$  的包含  $n_j \cdot m$  个方程的主线性方程组。

算法主要解决的问题为敏感性矩阵元素<sup>[13]</sup>, 即式(7)

中  $c_i$  系数  $\int_0^{t_k^j} B_i^2(t_k^j - \tau) \Delta p_{wf}(\tau) d\tau$  的快速计算。笔者采用分段积分求和方法计算该线性方程组的敏感性矩阵元素, 各分段积分分别对应各井底压力降落段所处的时间域:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_k^j} B_i^2(t_k^j - \tau) \Delta p_{wf}(\tau) d\tau &= \int_0^{t_1^j} B_i^2(t_k^j - \tau) \cdot \\ &\Delta p_{wf}^0(\tau) d\tau + \int_{t_1^j}^{t_2^j} B_i^2(t_k^j - \tau) \Delta p_{wf}^1(\tau) d\tau + \\ &\int_{t_2^j}^{t_3^j} B_i^2(t_k^j - \tau) \Delta p_{wf}^2(\tau) d\tau + \dots + \int_{t_j^j}^{t_k^j} B_i^2(t_k^j - \tau) \cdot \\ &\Delta p_{wf}^j(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

由于式(8)中每个褶积积分中的井底压力降  $\Delta p_{wf}^j$  均为固定值, 根据二阶 B 样条函数定义可以直接推导出式(8)中每个褶积积分的解析表达式<sup>[13,20]</sup>, 解析方法可大大提高计算效率; 同时对于给定的流量数据点, 可利用二分法快速查找该流量数据点所属的压力降落段, 进一步提高计算效率。

### 2.3 正则化方法

数据误差水平增加时, 为了使得计算出的数据结果与实际物理背景保持较好的相关性, 引入了 ILK 压力反褶积算法中的正则化方法<sup>[10,13]</sup>; 对流量导数  $q'_u$  进行正则化, 正则化线性方程组为:

$$\alpha \left\{ \left[ t \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(t) \right]_{t=T_n} - \left[ t \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(t) \right]_{t=T_{n+1/2}} \right\} = 0 \quad (n = 0, 1, 2, \dots, M-2) \quad (9)$$

$$\alpha \left\{ \left[ t \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(t) \right]_{t=T_{n+1/2}} - \left[ t \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(t) \right]_{t=T_{n+1}} \right\} = 0 \quad (n = 0, 1, 2, \dots, M-2) \quad (10)$$

式(9)和式(10)可以使得  $q'_u$  在结点和结点中间值之间的差别较小; 当光滑化因子  $\alpha=0$  时, 表示没有正则化; 当生产数据存在误差时, 需要选择正的  $\alpha$  值 ( $0 \leq \alpha < 1$ ) 削弱误差影响。

### 2.4 约束条件

由主线性方程组 (需乘以光滑化因子  $\alpha$ ) 和正则化线性方程组共同构成了一个超定线性方程组:

$$(1-\alpha) \cdot \mathbf{XC} = (1-\alpha) \cdot \mathbf{Q} \quad (11)$$

$$\alpha \cdot \mathbf{X}_r \mathbf{C} = 0 \quad (12)$$

采用线性最小二乘方法<sup>[13]</sup> 对式(11)—式(12)进行求解。求得待定参数  $c_i$  后, 由式(6)即可求得单位压降下瞬时流量导数  $q'_u$ ; 而瞬时流量  $q_u$  可以通过  $q'_u$  的积分求得:

$$q_u(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^u c_i B_i^2(\tau) d\tau = \sum_{i=1}^u c_i \int_0^t B_i^2(\tau) d\tau \quad (13)$$

由式(7)还可计算出由二阶 B 样条拟合出的  $q$ , 进而可以与实际流量进行对比, 检验反褶积计算的拟合效果; 正则化时, 可作为约束条件对光滑化因子和样条基数的取值进行约束<sup>[10]</sup>。

## 3 理论算例测试

### 3.1 算法的正确性验证

由 KAPPA 软件模拟计算了油藏径向渗流连续 2 个不同生产压力段下的瞬时流量变化。表 2 和表 3 分别为油藏参数数据和生产阶段压力数据。瞬时流量数据共包括 234 个数据点, 如图 2 所示。此外, 还模拟计算了相同模型参数下单位生产压力降下的瞬时流量数据, 作为反褶积计算结果的对比, 如图 3 所示。分别利用笔者改进的 ILK 反褶积算法和 ILK<sup>[20]</sup> 原反褶积算法进行计算; 其中, B 样条基数  $b$  为 2.1, 光滑化因子  $\alpha$  为零值。在双对数坐标中将计算结果与图 3 中模拟流量数据进行对比(图 4)。

由图 4 可以看出, 改进反褶积算法的计算结果与模拟流量数据吻合较好, 由此验证了改进算法的正确性; 而 ILK 的原反褶积算法的计算结果在流量变化初

表2 油藏参数数据

Table 2 Data of reservoir parameters

油藏参数	数值
渗透率/mD	50.00
油藏厚度/m	9.15
初始压力/MPa	34.47
井筒储集系数/(m <sup>3</sup> ·MPa <sup>-1</sup> )	2.30×10 <sup>-2</sup>
表皮系数	5.00
井控半径/m	67.10
孔隙度	0.10
井筒半径/m	0.09
流体黏度/(mPa·s)	1.00
体积系数/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	1.00
综合压缩系数/(MPa <sup>-1</sup> )	4.35×10 <sup>-4</sup>

表3 各生产阶段压力数据

Table 3 Pressure data of different production periods

生产阶段持续时间/d	井底压力/MPa
0~100	33.47
100~200	30.00

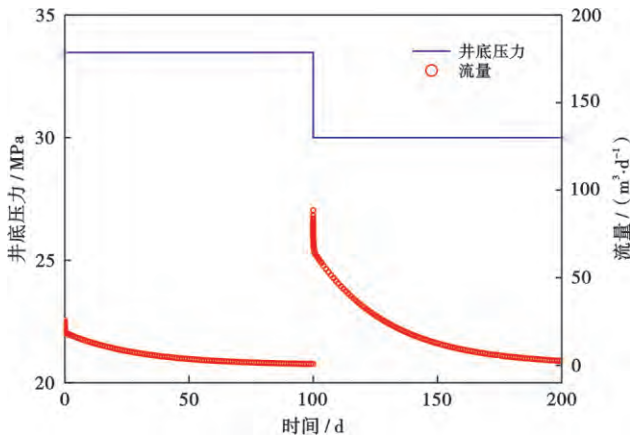


图2 变井底压力下的瞬时流量数据

Fig. 2 The transient production rate data corresponding to variable wellbore pressure

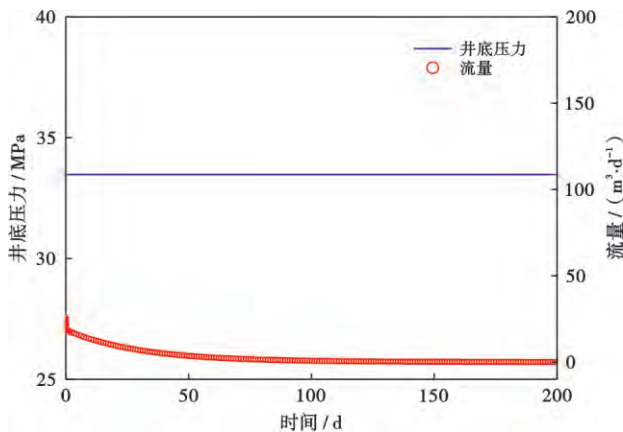


图3 单位井底压力降下的瞬时流量数据

Fig. 3 The transient production rate data corresponding to unit wellbore pressure drop

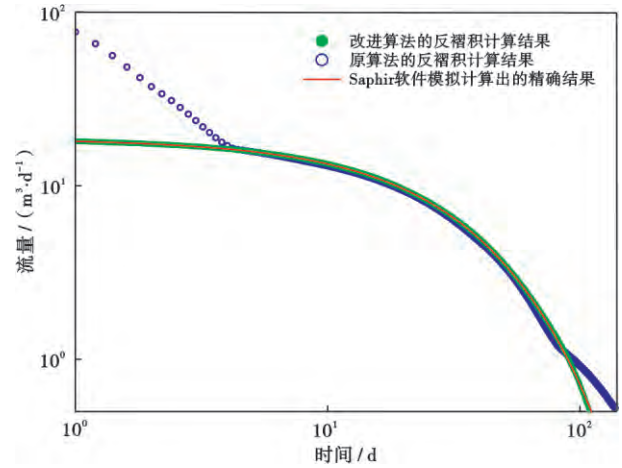


图4 反褶积计算结果的对比验证

Fig. 4 Comparative verification of deconvolution calculation results

期和后期阶段存在较大偏差。由于初期单位压差下的流量变化较快,而后期流量很小接近于零,初期和后期的计算结果受算法精度影响较大。因此,应基于流量数据即褶积方程式(4)建立精确算法。

### 3.2 算法的稳定性测试

为了测试反褶积算法的稳定性,算例中原始流量数据加入了10%随机误差(图5)。正则化过程中,在满足约束条件下(图6),选取尽可能大的光滑化因子 $\alpha$ 值,同时对B样条基数 $b$ 的取值进行优选<sup>[13]</sup>;计算测试表明在满足约束条件下,光滑化因子 $\alpha$ 值影响较小。

取 $\alpha$ 值为0.01,B样条基数 $b$ 分别取值为1.8、2.4、2.8、3.0和3.4进行流量反褶积计算;由图6可以看出,计算结果均满足约束条件。分别利用对应不同B样条基数 $b$ 值下反褶积计算出的流量数据、单位井底压力降下的精确流量数据以及含10%随机误差的原始流量数据计算出了Blasingame产量递减分析<sup>[23]</sup>的特征参数数据(图7)。

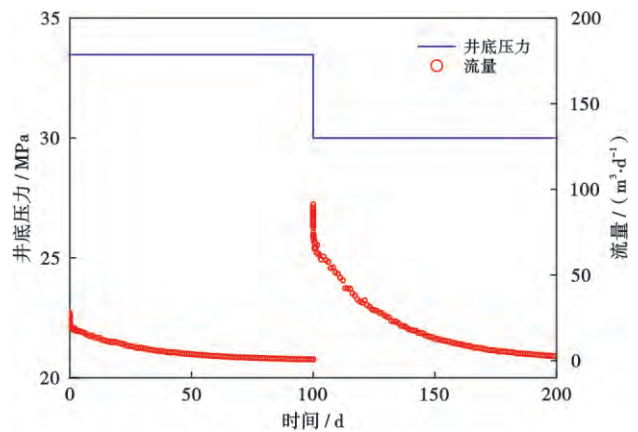


图5 变井底压力下含10%随机误差的瞬时流量数据

Fig. 5 The transient production rate data corresponding to variable wellbore pressure with 10% random errors

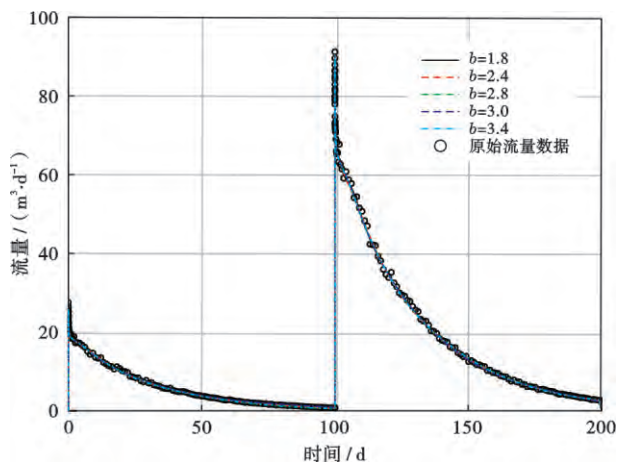


图 6 流量反褶积计算正则化过程的约束条件

Fig. 6 The constraint condition during the regularization process for the rate deconvolution computation

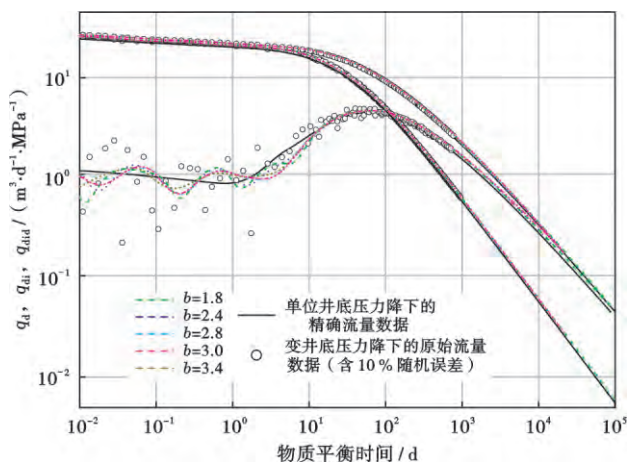


图 7 流量数据误差对 Blasingame 产量递减特征参数数据计算的影响

Fig. 7 The effect of production rate data errors on the computation of the characteristic parameter data for production decline analysis by the Blasingame method

由图 7 可以看出,流量数据误差主要影响不稳定渗流段规整化产量积分导数的数据计算,会造成数据震荡。直接采用原始流量数据,数据震荡较严重;而采用反褶积流量数据可有效降低数据误差的影响,显示出了较高的稳定性。由图 7 还可看出,在 1.8~3.4 范围内,  $b$  值对计算结果影响不大。

## 4 实际算例应用

### 4.1 ILK 算法与改进 ILK 算法的计算结果对比

将反褶积应用于塔里木油田 F 井的产量递减分析。F 井基本参数为<sup>[23]</sup>:初始压力为 70.8 MPa,地层温度为 136.4℃,有效厚度为 26.0 m,孔隙度为 3%,含油饱和度为 80%,泡点压力 45.1 MPa,原油密度

为 800 kg/m<sup>3</sup>。折算的井底压力及流量如图 8 所示,共包括 200 个井底压力点及其对应的 200 个流量点。

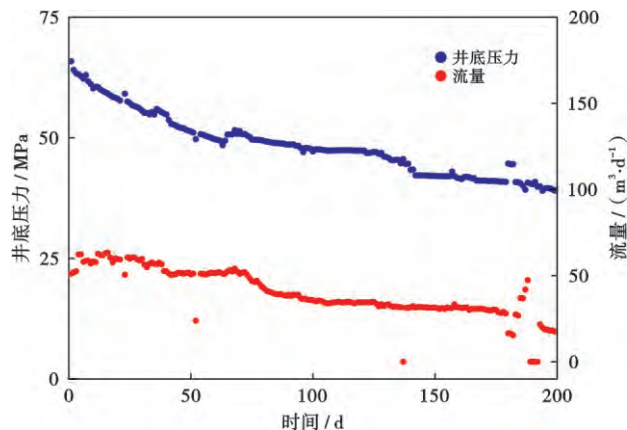


图 8 F 井的井底压力及流量变化

Fig. 8 The change of the wellbore pressure and the production rate of the Well F

利用改进的 ILK 反褶积算法将图 8 中变井底流压下的油井产量转化为单位压降下的油井流量,并通过前述的 B 样条基数  $b$  和光滑因子  $\alpha$  的参数调试方法进行正则化,以消除误差影响。在  $b=3.2, \alpha=0.001$  时,计算结果大致满足约束条件,如图 9 所示;此时,输出反褶积计算结果如图 10 所示。计算耗时不足 1.0 s。由于改进算法采用了解析方法,数据量越大,计算速度优势会越来越明显。

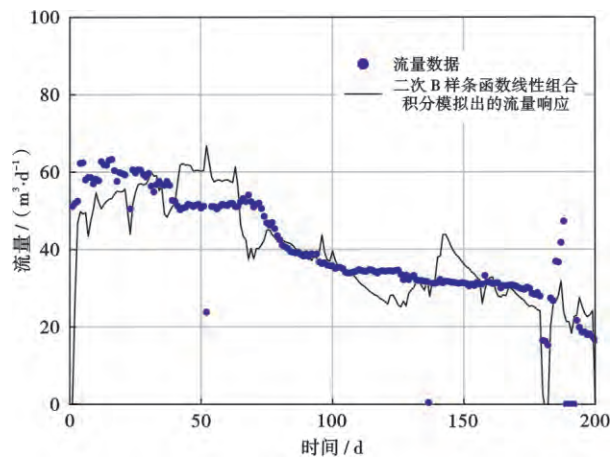


图 9 F 井流量反褶积计算正则化过程的约束条件

Fig. 9 The constraint condition during the regularization process for the rate deconvolution computation of Well F

此外,采用 ILK 原算法进行反褶积计算,以与改进 ILK 算法的计算结果进行对比(图 10)。由图 10 可以看出,由原算法计算出的流量数据在初始阶段出现较大波动,而由改进算法计算出的流量数据较为规则,更符合单位井底压力降下流量的递减变化规律。

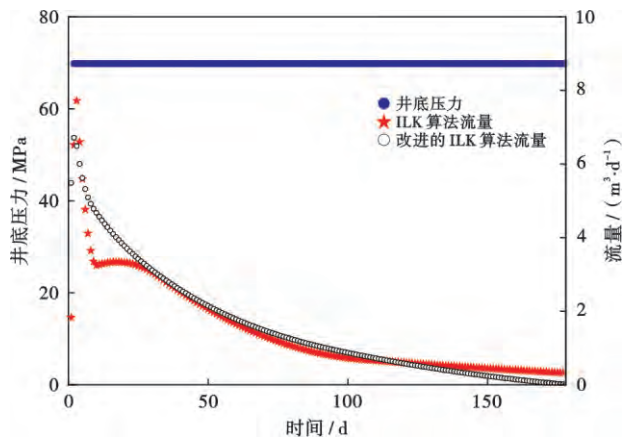


图 10 反褶积计算出的 F 井单位压降下的流量变化  
Fig. 10 The production rate behavior of the Well F corresponding to the unit pressure drop from deconvolution computation

#### 4.2 ILK 算法与改进 ILK 算法计算结果的产量递减分析对比

利用反褶积首先将变井底压力下流量数据转化为单位井底压降下流量数据,然后再对其进行产量递减分析,特征参数数据点会出现持续时间范围更长、更为清晰且光滑的 3 条特征直线段(受边界控制)<sup>[24]</sup>,可以

提高特征参数数据的拟合效果,降低解释结果的不确定性。采用 FAST RTA 软件分别对由改进算法与原算法计算出的反褶积流量数据进行 Blasingame 产量递减分析,如图 11 所示。由图 11(a)和图 11(b)对比可以看出,在利用 Blasingame 方法对改进 ILK 反褶积算法计算输出的流量数据进行产量递减分析时,计算得到的特征参数数据点更为集中、数据曲线更为光滑,与理论曲线版有较高的拟合度,显著提高了特征参数数据的拟合效果;然而在采用 ILK 原算法计算输出的流量数据时,计算得到的特征参数数据点分布较为散乱,规则化产量和产量积分数据出现缺失,表征拟稳态流的特征直线段长度变短,增加了解释难度,不利于产量递减分析的数据拟合,由此减弱了反褶积在产量递减分析中的作用。

由原算法计算结果拟合分析出的动态储量值为  $8.36 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 而由改进 ILK 算法计算结果拟合分析出的动态储量值为  $8.78 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。文献[23]分别采用 5 种现代产量递减分析方法对该实际算例原始生产数据进行了分析,拟合分析出的动态储量平均值为  $9.19 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,该统计平均值可近似看作准确值。由改进 ILK 算法计算结果拟合分析出的动态储量值与动态储量平均值<sup>[23]</sup>更为接近。

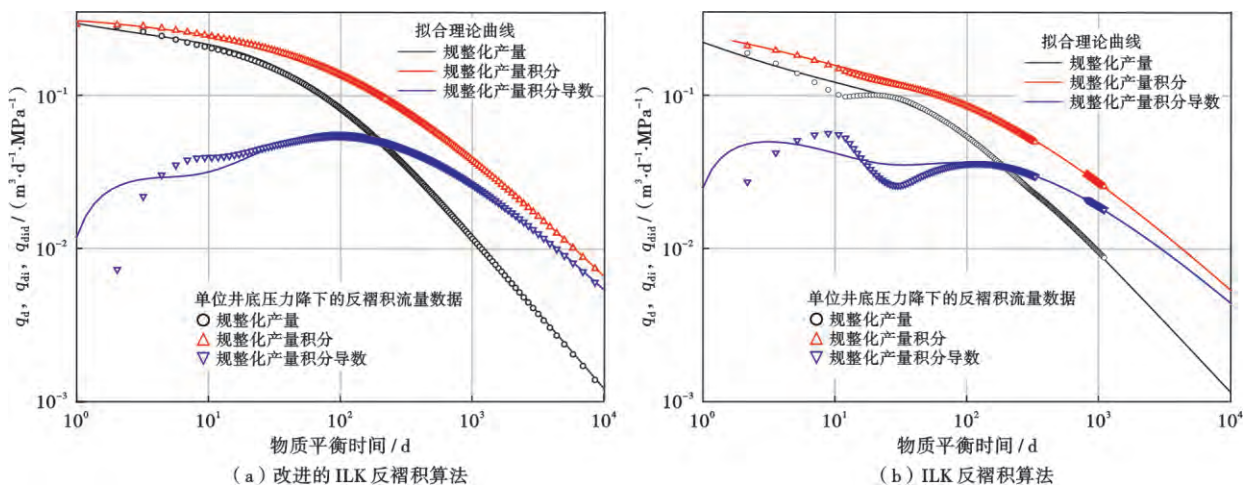


图 11 反褶积流量数据的 Blasingame 产量递减分析对比

Fig. 11 The comparison of production decline analysis by the Blasingame method on the production rate data from deconvolution computations

数值实验还表明:在正则化过程中,满足约束条件下,光滑因子  $\alpha$  对反褶积计算结果影响较小,主要通过调节 B 样条基数的调节进行正则化;而 B 样条基数对产量递减分析结果的影响不大。因此,对反褶积计算出的单位井底压力降下流量数据进行产量递减分析可以获得正确、稳定的参数解释结果。

## 5 结论

(1) 由于初期单位压差下的流量变化较快,且后

期流量接近于零,初期和后期的计算结果受算法精度影响较大;而这些计算结果会对产量递减分析特征参数数据的计算产生较大影响。为了提高计算精度,对 ILK 流量反褶积算法进行了改进:基于一个等价的褶积积分方程,采用流量数据进行反褶积计算,而非原 ILK 算法中的累积流量数据,并给出了反褶积计算的快速解析求解方法。

(2) 通过理论和实际算例分析表明:改进算法具有很高的计算精度;应用于产量递减分析时可以获得

更为可靠的解释结果;而ILK原算法在初期和后期阶段存在较大偏差,在进行产量递减分析时,会导致特征参数数据点出现较大波动甚至缺失,表征拟稳态流的特征直线段长度变短,会减弱反褶积的作用。改进算法同时具备了较高的计算速度、稳定性及实用性。

(3) 采用经反褶积转化后的流量数据进行产量递减分析不仅可以有效降低数据误差影响的敏感性,还可以获得更多的信息量,能提高数据的拟合效果,降低解释结果的不确定性。

符号注释:  $p_{mi}$ —油藏初始压力,MPa;  $t$ —时间,d;  $\tau$ —积分变量,d;  $q$ —变流量,  $m^3/d$ ;  $p$ —变流量下的井底压力,MPa;  $p_u$ —单位流量下的井底压力响应,MPa;  $p'_u$ —单位流量下井底压力关于时间的导数,MPa/d;  $\Delta p_{wf}$ —变井底压力降,MPa;  $\Delta p'_{wf}$ —变井底压力降关于时间的导数,MPa/d;  $q_u$ —单位井底压力降下的瞬时流量响应,  $m^3/d$ ;  $N_p$ —累积流量,  $m^3$ ;  $q'_u$ —单位井底压力降下的瞬时流量导数,  $m^3/d^2$ ;  $i$ —待定参数的标号;  $c_i$ —第  $i$  个待定参数;  $B_i^2$ —由按对数分布结点产生的第  $i$  个二阶B样条函数;  $u$ —二阶B样条函数的总数;  $j$ —井底压力降值的标号;  $\Delta p_{wf}^j$ —第  $j$  个井底压力降值,MPa;  $t_j$ —第  $j$  个井底压力降落段的开始时间,d;  $t_{j+1}$ —第  $j+1$  个井底压力降落段的结束时间,d;  $n_j$ —第  $j$  个井底压力降落段所观测到的有效流量数据点总数;  $k$ —有效瞬时流量观测数据点的标号;  $t_k^j$ —第  $j$  个井底压力降落段所观测到的第  $k$  个有效流量数据点的时间,d;  $q_k^j$ —第  $j$  个井底压力降落段所观测到的第  $k$  个流量数据点的流量,  $m^3/d$ ;  $\alpha$ —光滑因子;  $b$ —B样条基数;  $T_n$ —由B样条基数  $b$  所产生的按对数分布的二阶B样条函数的结点(结点生成方法可参见文献[10, 13]);  $n$ —结点的标号;  $M$ —结点的总数;  $C$ —关于待定系数  $\{c_i\}$  的  $u$  阶向量;  $X$ —主线性方程组的  $n_j \cdot m \times u$  阶敏感性矩阵;  $X_r$ —正则化线性方程组的  $2 \cdot (M-1) \times u$  阶系数矩阵;  $Q$ —关于有效流量  $\{q_k^j\}$  的  $n_j \cdot m$  阶向量;  $q_d$ —规整化产量,  $m^3/(d \cdot MPa)$ ;  $q_{di}$ —规整化产量积分,  $m^3/(d \cdot MPa)$ ;  $q_{di}$ —规整化产量积分导数,  $m^3/(d \cdot MPa)$ 。

### 参 考 文 献

[1] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 5版. 北京:石油工业出版社,2008.  
LIU Nengqiang. Applied modern well test interpretation method [M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.

[2] ÇINAR M, ILK D, ONUR M, et al. A comparative study of recent robust deconvolution algorithms for well-test and production-data analysis[R]. SPE 102575, 2006.

[3] ONUR M, ÇINAR M, ILK D, et al. An investigation of recent

deconvolution methods for well-test data analysis [R]. SPE 102575, 2006.

- [4] GRINGARTEN A C. Practical use of well-test deconvolution [R]. SPE 134534, 2010.
- [5] 林加恩, 何辉, 韩章英. 未出现径向流的试井典型曲线及其分析方法[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 562-569.  
LIN Jia'en, HE Hui, HAN Zhangying. Typical curves and their analysis method for well test data without radial flow response [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 562-569.
- [6] VON SCHROETER T, HOLLAENDER F, GRINGARTEN A C. Deconvolution of well-test data as a nonlinear total least-squares problem [J]. SPE Journal, 2004, 9(4): 375-390.
- [7] LEVITAN M M. Practical application of pressure-rate deconvolution to analysis of real well tests[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(2): 113-121.
- [8] LEVITAN M M, CRAWFORD G E, HARDWICK A. Practical considerations for pressure-rate deconvolution of well test data [J]. SPE Journal, 2006, 11(1): 35-47.
- [9] LEVITAN M M. Deconvolution of multiwell test data[R]. SPE 102484, 2007.
- [10] ILK D, VALKÓ P P, BLASINGAME T A. Deconvolution of variable-rate reservoir performance data using B-splines[R]. SPE 95571, 2005.
- [11] 李勇, 李保柱, 胡永乐, 等. 反褶积法在气井早期地层测试解释中的应用[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 298-301.  
LI Yong, LI Baozhu, HU Yongle, et al. Application of deconvolution algorithm to early formation interpretation of gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 298-301.
- [12] 王飞, 潘子晴. 致密气藏压裂水平井反卷积分井模型[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 898-902.  
WANG Fei, PAN Ziqing. Deconvolution-based well test model for the fractured horizontal wells in tight gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7): 898-902.
- [13] LIU W C, LIU Y W, HAN G F, et al. An improved deconvolution algorithm using B-splines for well-test data analysis in petroleum engineering[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 306-314.
- [14] PIMONOV E, AYAN C, ONUR M, et al. A new pressure/rate-deconvolution algorithm to analyze wireline-formation-tester and well-test data[R]. SPE 123982, 2009.
- [15] CUMMING J, WOOFF D, WHITTLE T, et al. Multiwell deconvolution[R]. SPE 166458, 2013.
- [16] KUCHUK F J, HOLLAENDER F, GOK I M, et al. Decline curves from deconvolution of pressure and flow-rate measurements for production optimization and prediction [R]. SPE 96002, 2005.
- [17] 魏明强, 段永刚, 方全堂, 等. 基于物质平衡修正的页岩气藏压裂水平井产量递减分析方法[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 508-515.  
WEI Mingqiang, DUAN Yonggang, FANG Quantang, et al. Production decline analysis method of fractured horizontal well in shale gas reservoirs based on modifying material balance[J]. Ac-

- ta *Petrolei Sinica*, 2016, 37(4): 508-515.
- [18] 陈元千, 唐玮. 广义递减模型的建立及应用[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1410-1413.  
CHEN Yuanqian, TANG Wei. Establishment and application of generalized decline model[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(11): 1410-1413.
- [19] 孙贺东, 欧阳伟平, 张冕. 基于数值模型的气井现代产量递减分析及动态预测[J]. *石油学报*, 2017, 38(10): 1194-1199.  
SUN Hedong, OUYANG Weiping, ZHANG Mian. Advanced production decline analysis and performance forecasting of gas wells based on numerical model[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10): 1194-1199.
- [20] ILK D, VALKÓ P P, BLASINGAME T A. A deconvolution method based on cumulative production for continuously measured flowrate and pressure data[R]. SPE 111269, 2007.
- [21] ZHENG S Y, WANG F. Application of deconvolution and decline-curve analysis methods for transient pressure analysis[R]. SPE 113323, 2008.
- [22] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.  
KONG Xiangyan. *Advanced seepage flow mechanics* [M]. 2nd ed. Hefei: University of Science & Technology of China Press, 2010.
- [23] 孙贺东. 油气井现代产量递减分析方法及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.  
SUN Hedong. *Advanced production decline analysis and application* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [24] 刘文超. 非常规气藏中渗流模型及反褶积方法与应用[R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2016.  
LIU Wenchao. *Seepage flow models in unconventional gas reservoirs and deconvolution methods with applications* [R]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- (收稿日期 2017-06-02 改回日期 2017-12-20 编辑 王培玺)

(上接第 326 页)

- [19] 李勇, 陈瑶, 靳建洲, 等. 页岩气井体积压裂条件下的水泥环界面裂缝扩展[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 105-111.  
LI Yong, CHEN Yao, JIN Jianzhou, et al. Cement ring interface crack propagation under volume fracturing in shale gas well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 105-111.
- [20] 赵金洲, 彭瑀, 林啸, 等. 考虑复杂应力分布的数值缝宽计算模型及其应用[J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 914-920.  
ZHAO Jinzhou, PENG Yu, LIN Xiao, et al. Numerical fracture width model considering complex stress distribution and its application[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 914-920.
- [21] GHASSEMI A, ZHOU X X, RAWAL C. A three-dimensional poroelastic analysis of rock failure around a hydraulic fracture [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 108: 118-127.
- [22] WU Kan, OLSON J E. Mechanisms of simultaneous hydraulic fracture propagation from multiple perforation clusters in horizontal wells[J]. *SPE Journal*, 2016, 21(3): 1000-1008.
- [23] 赵熙. 页岩压裂裂纹三维起裂与扩展行为的数值模拟与实验研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.  
ZHAO Xi. Numerical simulation and experimental study on three dimensional crack initiation and propagation of shale stimulated by hydro-fracture [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.
- [24] WARPINSKI N R, WOLHART S L, WRIGHT C A. Analysis and prediction of microseismicity induced by hydraulic fracturing [J]. *SPE Journal*, 2004, 9(1): 24-33.
- [25] WOOD D B, JUNKI G. Stresses and displacements around hydraulically fractured wells: fall meeting of the society of petroleum engineers of AIME, Texas, 4-7 October, 1970[C]. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1970.
- [26] WU Kan, OLSON J E. Simultaneous multifracture treatments: fully coupled fluid flow and fracture mechanics for horizontal wells[J]. *SPE Journal*, 2015, 20(2): 337-346.
- [27] CROUCH S L. Solution of plane elasticity problems by the displacement discontinuity method. I. Infinite body solution[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1976, 10(2): 301-343.
- [28] CROUCH S L, STARFIELD A M. Boundary element methods in solid mechanics: with applications in rock mechanics and geological engineering[M]. London: George Allen & Unwin, 1983: 1-50.
- [29] OLSON J E. Fracture mechanics analysis of joints and veins[D]. Stanford CA: Stanford University, 1991.
- [30] 曾青冬, 姚军. 水平井多裂缝同步扩展数值模拟[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1571-1579.  
ZENG Qingdong, YAO Jun. Numerical simulation of multiple fractures simultaneous propagation in horizontal wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1571-1579.
- (收稿日期 2017-04-24 改回日期 2018-01-02 编辑 王培玺)