

基于卷积和矩阵变流量压降试井解释新方法

孟宪伟, 刘洪杰, 王佩文, 刘 军, 张 浩, 郑建军

中海石油(中国)有限公司蓬勃作业公司 天津 300459

通讯作者:Email:mengxw@cnooc.com.cn

项目支持:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)

引用:孟宪伟, 刘洪杰, 王佩文, 等. 基于卷积和矩阵变流量压降试井解释新方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(3):1-6.

Cite: MENG Xianwei, LIU Hongjie, WANG Peiwen *et al.* A new interpretation technique based on convolution and matrix for variable-rate falloff test [J]. Well Testing, 2018, 27(3):1-6.

摘要 为解决油井压降测试过程中变流量下的压力动态响应问题,克服实际应用中缺少高精度压力数据的困难,使不稳定试井分析方法能够应用实际生产动态数据评价油气藏,应用杜哈美积分原理结合线性系统的卷积理论引出基于离散系统卷积和矩阵的压力动态响应关系式,选用单井径向流点源函数建立模型;利用油井实际压降测试数据和最优化方法求解符合该井实际生产动态的模型参数。利用离散系统卷积和矩阵关系式模型结合最优化方法求得的压力响应结果符合实际生产动态,求解得到理论解和实际测试结果误差较小;模型反映了油井的生产动态特性,可对油气藏历史生产状况进行评价,同时对生产动态预测具有较好应用价值。通过建立卷积和矩阵关系式模型,解决了变流量下的压力动态响应和缺少高精度压力条件下不稳定压力分析方法解释困难的问题。该模型可扩展性强,应用点源函数理论可推广到不同的实际油藏模型。

关键词 变流量试井;压降测试;杜哈美原理;卷积;矩阵;最优化方法;点源函数**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.03.001

A new interpretation technique based on convolution and matrix for variable-rate falloff test

MENG Xianwei, LIU Hongjie, WANG Peiwen, LIU Jun, ZHANG Hao, ZHENG Jianjun

Pengbo Operation Company of CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin 300459, China

Abstract: To highlight dynamic pressure responses under variable flow during falloff test of oil wells for providing high-resolution pressure data to facilitate the pressure transient well testing in reservoir assessment, the Duhamel integral principle and the convolution theory for linear system were combined to generate the correlation between discrete system convolution sum matrix for identifying dynamic pressure responses. Then, the model was constructed by using radial flow point-source function of a well, and actual falloff test data and optimal method were used jointly to derive the model parameters conforming to the actual production performance of the well. It is indicated that the pressure responses derived by using the model constructed according to the discrete system convolution sum matrix correlation together with the optimal method coincide well with actual production performance. Minor errors are observed between actual testing data and the theoretical solution derived through optimal solution of the model. The proposed model reflects the production performance of oil well, and it can be used to assess the production history of reservoirs and also predict the production performance. The model based on the convolution sum matrix correlation can derive the dynamic pressure responses under variable flow and provides a technique of transient pressure analysis without high-precision pressure data. This model is expandable and can be extended to different reservoirs in conjunction with the point-source function.

Keywords: variable-rate well testing; falloff test; Duhamel's principle; convolution; matrix; optimal method; point-source function

试井分析方法目的是基于确定的油藏模型建立理论模型模拟实测产量和压力响应关系,常规试井方法和压力导数分析都依赖于能够获取高质量的压力数据^[1]。赵春明等^[2]将反褶积试井方法应

用在渤海油田并取得较好效果,林炳南等^[3]将反褶积方法在海上探井上进行了应用解决了封闭断层早期探测的油藏动态特征。严涛等^[4]将反褶积方法应用到凝析气井中准确地识别了油藏外边界问

题。李峰进^[5]利用反褶积方法处理和折算后 DST 早期资料,得出低产、低渗地层中径向流直线段。陈伟等^[6]提出续流量反褶积方法并应用 Laplace 数值反演算法及 Laplace 空间的开展续流量反褶积的研究,解决了早期资料多解性问题。魏聪等^[7]利用反褶积试井解释技术检验全程压力史拟合,解决了测试时间短导致的多解性问题。林加恩等^[8]应用 Tiab 思想处理多级变流量问题,将变流量问题叠加转化为等效时间形式的压力函数取得较好的拟合结果。求解油藏模型的方法很多,如还可利用生产测试确定地层参数^[9]。反褶积是利用输入和输出反求模型的问题,反问题存在多解性,因此利用最优化方法是求解该问题的一种思路^[10]。Gringarten^[11]和 Schroeter^[12]对反褶积方法本身进行深入研究,分析了实数空间计算过程中的敏感性和不稳定性问题。Levitan M.^[13]对该算法作了进一步的改进,实际应用中计算结果一致^[14]。大量文献调研表明,反褶积不稳定压力分析具有较广泛的应用^[15-16],对该方法的研究具有一定推进作用。

针对海上平台油井通常由于测试作业成本高,关井压力恢复测试付出的隐形产量成本使压力测试较难实施。因而高质量压力数据的获取限制了反褶积不稳定试井分析方法的应用。此外,在不稳定压力试井分析中,由于表皮系数变化、油井工作制度变化、地层能量变化、测量仪器等因素引起测试数据变化和波动,通常会给解释工作带来一定困难。本文利用新区内油井投产初期的生产数据并结合径向流动模型建立卷积和矩阵关系式来计算变流量下压力响应,并求得油藏理论模型参数。利用生产测试数据从动态角度、利用不稳定试井理论求得的油藏特性参数更加符合油藏生产动态规律,对后续油藏动态预测更具有实际借鉴意义。

1 卷积及卷积和表示式导出

由杜哈美原理可得出变流量下的压力响应形式为^[17]

$$p(r, t) = f_0(r) + \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} F(r, t - \tau) d\tau \quad (1)$$

式中: $f_0(r)$ 为初始条件; $F(r, t - \tau)$ 为在泛定方程下边界条件限定为不带时间变量的解。

由于已知初始条件和边界条件为无限大地层定产量点汇问题的解,从而可得到径向流阶段压力变化表示式,即

$$\Delta p(r_w, t) = \frac{0.921q\mu B}{Kh} \left[-\text{Ei} \left(-\frac{\varphi\mu C_l r_w^2}{0.0144Kt} \right) \right] \quad (2)$$

式中: q 为井口流量, m^3/d ; Δp 为井底压力变化, MPa ; K 为地层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; r_w 为井半径, m ; h 为地层厚度, m ; C_l 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; φ 为地层孔隙度, 小数; B 为流体体积系数, 无因次; t 为生产时间, h 。

则径向流点汇系统下的杜哈美积分形式为

$$\begin{aligned} \Delta p(r_w, t) &= \frac{0.921\mu B}{Kh} \int_0^t q(\tau) \left[-\text{Ei} \left(-\frac{\varphi\mu C_l r_w^2}{0.0144K(t - \tau)} \right) \right] d\tau \\ &= \frac{0.921\mu B}{Kh} [q(t)h'(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $h(t) = -\text{Ei} \left(-\frac{\varphi\mu C_l r_w^2}{0.0144Kt} \right) = \frac{Kh}{0.921q\mu B} \Delta p$

式中: $q(t) \cdot h'(t)$ 为卷积表示形式。

文献[1]中, $h(t)$ 称为重整压力响应, 此处为单位流量变化下的纯径向流压力响应函数, 即为信号与系统理论中单位阶跃响应函数^[18], 其导数 $h'(t)$ 为单位冲击响应函数。(3)式的表示方法即为数学上的连续系统的卷积形式。针对变流量问题, 杜哈美原理反映的物理意义为: 在 τ 时刻由 $q(\tau)$ 引起的压力响应为 $q(\tau)h'(t)d\tau$, 而在整个 $(0 \sim t)$ 时间间隔内变化的产量历史引起的最终压力响应 $q(t)$ 为各个时刻的压力响应在 $(0 \sim t)$ 内的积分。即变产量下的压力响应等于产量函数和单位产量引起的压力响应对时间导数的卷积。卷积公式表现了把变流量下的压力响应情况转化为恒定产量条件下的压力响应叠加的结果。

针对离散的生产测试数据, 利用离散系统信号的输入输出和单位冲击响应的卷积和关系^[19], 上述卷积积分形式可转成卷积和形式如下:

$$\begin{aligned} \Delta p[t] &= \frac{0.921\mu B}{Kh} \Delta\tau \sum_{n=0}^t q[n]h'[t-n] \\ &= \frac{0.921\mu B}{Kh} \Delta\tau \{q[t]h'[t]\} \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式为基于离散系统条件下的变流量和压力响应关系式, 此式为卷积和表示形式, 其中 $h'[t]$ 式为径向流阶段点汇系统的源函数的表达式, 而针对非径向流系统, 利用 Gringarten 等^[20]研究成果, 针对非径向流油藏模型利用格林函数得到的点源函数关系式 $S(x, y, z, t)$, 结合 Newman 乘积方法和镜像映射原理进行扩展, 按需可将不同油藏系统的源函

数表达式代替 $h'[t]$ 后即可推广应用于其它类型油藏系统模型中。

上述离散系统卷积和(4)式转换成由流量变化史和压力变化史求取 $h'[t]$ 中的各项模型参数问题。基于(4)式并在历史测试数据点上展开,可转换成卷积和矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} p[0] \\ p[1] \\ p[2] \\ \vdots \\ p[t] \end{bmatrix} = \frac{0.921\mu B}{Kh} \Delta\tau \times \begin{bmatrix} h'[0] & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h'[1] & h'[0] & 0 & \cdots & 0 \\ h'[2] & h'[1] & h'[0] & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h'[t] & h'[t-1] & h'[t-2] & \cdots & h'[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q[0] \\ q[1] \\ q[2] \\ \vdots \\ q[t] \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\Delta\tau$ 取决于测试数据的精度,如测试数据为日数据,可取 $\Delta\tau = 24$ h,由于流量历史 $q[n]$ 和压力历史 $p[n]$ 已知,利用迭代求解可得:

$$\frac{0.921\mu B}{Kh} \cdot \Delta\tau \cdot h'[0] = p[0]/q[0]$$

$$\frac{0.921\mu B}{Kh} \cdot \Delta\tau \cdot h'[1] = (p[1] - h[0]q[1])/q[0]$$

$$\begin{aligned} \frac{0.921\mu B}{Kh} \cdot \Delta\tau \cdot h'[2] \\ = (p[2] - h[1]q[1] - h[0]q[2])/q[0] \end{aligned}$$

以此类推,可迭代得出 $h[t]$ 的一般表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{0.921\mu B}{Kh} \cdot \Delta\tau \cdot h'[t] \\ = (p[t] - \sum_{n=0}^{t-1} h[n]q[t-n])/q[0] \end{aligned}$$

虽然由上述解矩阵的迭代方法可依次迭代求出 $[0.921\mu B/(Kh)] \cdot \Delta\tau \cdot h'[n]$,但由于流量和压力存在一定误差,初始结果一点偏差会在迭代过程放大,从而得到的结果并不可靠。采用最优化方法可解决迭代后误差放大对计算结果带来的影响。初始化油藏参数后,利用该参数正向计算 $q[n]$ 引起的压力响应 $p[n]'$,建立与实际测试得到的 $p[n]$ 的偏差最小化的目标函数,由于整个历史的流量和压力数据都参与计算,从而模型特征更加符合生产实际。应用最优化算法求得最优的油藏模型参数,因此将离散系统变流量压力响应问题转换为数学问题,求解约束优化问题有较多方法,常用的有罚

函数方法^[21]、遗传演化算法^[22]。本文采用非线性求解方法中的罚函数方法求最优解,最后编制计算机程序实现计算结果。

3 矿场应用

由于上述卷积和形式的关系式反映了径向流阶段的压力响应,因此针对实际测试数据选取压力传播到边界前的测试数据,本文实例数据来源于封闭断块中新井投产初期的日产数据。由于无精密的压力数据,离散的测试数据无法监测井筒储集效应的影响,无法考虑井筒储集效应。其中表皮效应的影响包含在了井半径的量化中,在求解中将井半径作为自变量优化求解,得到的结果为折算半径,包含了表皮效应影响参数。对于径向流表皮效应和井半径折算关系: $S = -\ln(r_{we}/r_w)$ 。下述实例为封闭断块内一口新井压降测试分析。

P07井为渤海区域某封闭断块内一口新井,为定量评价该区块油藏特征和油井储层压力响应情况,需要对该井进行定量评价,由于压力计监测精度问题无法获取精密的高质量压力数据,压力导数分析方法无法应用,为能够利用离散测试数据进行不稳定压力试井分析,同时为避免仪器的测量误差对结果带来的影响,因此应用卷积和矩阵和最优化方法结合进行该井不稳定试井压力解释。应用经验公式 $t_s \approx 28(\varphi\mu C_t A)/K$,根据相邻断块地质油藏评价结果初步估算达到拟稳定流动所需要的时间^[23]。从测试数据看出(表1),P07井的流量变化较大,该井上线初期流量从 $562 \text{ m}^3/\text{d}$ 逐步下降至 $416 \text{ m}^3/\text{d}$,下降幅度达到 26%,数据频度为日度数据,因此取 $\Delta\tau = 24$ h。

模型计算和拟合过程如下:初始化模型所需各项参数($K, h, \mu, C_t, B, \varphi, r_w$),并由测试点全部数据同时参与计算,用实测流量数据应用到上述卷积和矩阵乘积(5)得到模型的压力响应记为 $p[n]'$,与实测压力响应数据的偏差最小化为目标函数 $\sum_{n=0}^t (p[n] - p[n'])^2$,选取需要求解模型参数作为决策变量,问题转化为有约束条件下最小值的非线性规划求解。上述求解模型最优解问题转为数学规划问题描述如下:

$$\begin{aligned} \min & \left(\sum_{n=0}^t (p[n] - p[n'])^2 \right) \\ \text{s.t.} & 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K < 2000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \\ & 10 \text{ mPa}\cdot\text{s} < \mu < 300 \text{ mPa}\cdot\text{s} \end{aligned}$$

$0.003\text{ MPa}^{-1} < C_i < 0.006\text{ MPa}^{-1}$

表 1 P07 井初期实测流量和压力变化响应

Table 1 Well P07 actual well test flow rate and pressure drawdown response

生产时间/h	流量/(m ³ ·d ⁻¹)	压差/MPa
24	562.3	3.0
48	550.1	5.0
72	556.0	5.5
96	529.9	5.6
120	501.9	5.8
144	478.4	5.9
168	471.9	6.0
192	466.0	6.0
216	457.7	6.1
240	450.7	6.2
264	443.7	6.3
288	436.9	6.4
312	429.9	6.4
336	422.9	6.5
360	416.1	6.6

利用罚函数方法将有约束极值问题变为无约束极值问题。构造惩罚函数 $F(K, C_i, \mu, M^k)$ 、 M^k 为增加的惩罚因子,从而转为无约束极值问题^[24]:

$$F(K, C_i, \mu, M^k) = \sum_{n=0}^t (p[n] - p[n]')^2 + M^k \left[\frac{1}{2\,000 - K} + \frac{1}{K - 10} + \frac{1}{300 - \mu} + \frac{1}{\mu - 10} + \frac{1}{0.006 - C_i} + \frac{1}{C_i - 0.003} \right] \quad (6)$$

由此转换为求解 $\min F(K, C_i, \mu, M^k)$ 无约束问题的最小值问题,具体计算流程为

第一步:初始化模型参数,以 (K, μ, C_i) 作为决策变量参与计算,记为 $X^{(0)}$,初值需要满足约束条件;

第二步:选取适当的初始惩罚因子 $M^{(0)}$,降低系数 $c=8$,迭代精度 $\varepsilon=0.05$,迭代变量 $k=1$;

第三步:通过上述构造的惩罚函数,调用无约束优化方法求 $\min F(K, C_i, \mu, M^k)$ 的最优解,记为 $X^*(M^k)$;

第四步:检验最优解精度 $\|X^*(M^k) - X(M^{k-1})\| \leq \varepsilon$,如满足精度要求,求得最优解 $X^*(M^k)$,如果不满足精度要求,则转下一步;

第五步:计算 $M^{k+1} = M^k/c$,并令 $k=k+1$ 后转第三步。

应用 Python 语言并调用第三方科学计算库 Scipy 中 Optimize 模块计算^[25],编制计算机程序求解,其中各个迭代步的最优解的变化见表 2。

表 2 模型优化求解各步最优解

Table 2 Optimal solution of each step by the model

步骤	K /(10 ⁻³ μm ²)	μ /(mPa·s)	C_i /MPa ⁻¹
初值 $X^{(0)}$	50	11	0.003 1
第一步 $X^{(1)}$	207	40	0.004 8
第二步 $X^{(2)}$	213	45	0.005 5
第三步 $X^{(3)}$	227	47	0.005 9

实测数据计算和拟合后得到模型的压力响应见表 3。从表 3 可以看出,拟合压差和实测压差相对误差较小,表明模型能很好反映实际生产动态。

表 3 P07 井实测压差与拟合压差对比

Table 3 Comparison of draw down well test and model pressure response regression

生产时间/h	实测压差/MPa	拟合压差/MPa	相对误差/%
24	3.0	2.6	13
48	5.0	3.8	23
72	5.5	4.5	17
96	5.6	5.0	12
120	5.8	5.3	8
144	5.9	5.6	4.4
168	6.0	5.9	1.6
192	6.0	6.1	-0.8
216	6.1	6.2	-1.9
240	6.2	6.4	-2.7
264	6.3	6.5	-3.1
288	6.4	6.6	-3.1
312	6.4	6.6	-3.2
336	6.5	6.7	-3.0
360	6.6	6.8	-3.4

表 4 给出了模型参数解释结果与实验室分析对比,图 1 给出了实测压力与解释结果对比。

表 4 模型参数解释结果与实验室分析对比

Table 4 Comparison of reservoir model parameter and laboratory analysis

类别	K /(10 ⁻³ μm ²)	μ /(mPa·s)	C_i /MPa ⁻¹
优化方法结果	227	47	0.005 9
岩心和流体实验分析	294	42	0.004 8
偏差	13%	-6.8%	-9.3%

通过模型的压力响应和实测压力响应结果对比看出(图 1),模型输出结果与实测数据吻合程度较高。从模型得到的油藏参数与实验室岩心分析结果对比看出(表 4),该模型求得的参数具有较高可靠性。

该方法不但对生产历史进行了定量评估,同时为预测后续达到拟稳态后的生产动态提供了可靠的定量参数。定量评价该区块油藏特征及预测后

期的生产动态具有指导意义。

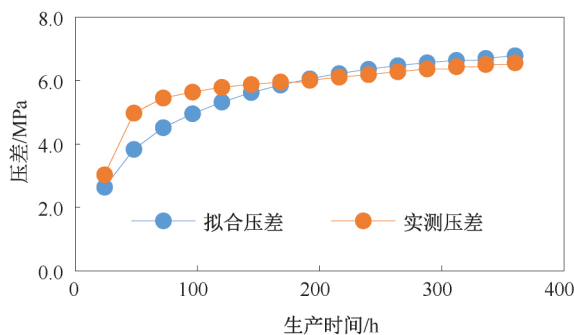


图1 P07井实测压力与解释结果对比

Fig.1 Comparison of pressure interpretation and well test of P07 well

4 结论

(1) 由连续系统卷积理论并选用径向流点汇系统源函数表达式导出离散情形下的变流量压降响应矩阵关系式,适用于径向流动阶段变流量下压力响应问题,对数据精度要求低、对数据范围较大情况也可得到较可靠的解释结果,适用范围广。

(2) 推导了径向流点汇系统的压力响应卷积和矩阵关系式可推广至其它不同模型。针对不同油藏系统模型,由格林函数得到的瞬时源函数点汇解的关系式可代替卷积和矩阵中的 $h^*[t]$ 后即可扩展应用到非径向流系统下的油藏模型进行矩阵的计算和拟合,方法应用具有可扩展性。

(3) 该方法计算结果反映了油藏在变流量下的动态反映特性,能够较好拟合单井的实际压力响应,评价油藏和预测具有较高可靠性。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司蓬勃作业公司同意该论文发表;感谢渤海石油研究院的科研项目资助。

参 考 文 献

- [1] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 第5版. 北京:石油工业出版社, 2008:312-318.
- [2] 赵春明,张迎春,戴卫华,等. 反褶积试井方法在渤海油田的应用[J]. 中国海上油气, 2010, 22(2): 111-113.
ZHAO Chunming, ZHANG Yingchun, DAI Weihua *et al.* An application of a deconvolution well test method to oilfields in Bohai sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(2): 111-113.
- [3] 林炳南,李清旺,李岳胜. 压力与产量反褶积在海上探井资料解释中的应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(4): 19-22.
LIN Bingnan, LI Qingwang, LI Yuesheng. The application of pressure and producing rate deconvolution on offshore exploratory [J] Well Testing, 2012, 21(4): 19-22.

- [4] 严涛,刘海涛. 反褶积试井解释方法在东海油气田中的应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(2): 35-37.
YAN Tao, LIU Haitao. Application of deconvolution well testing method in eastsea oil & gas field [J]. Well Testing, 2015, 24(2): 35-37.
- [5] 李峰进. 反褶积法在处理 DST 早期测试资料中的应用[J]. 油气井测试, 2010, 19(5): 48-50.
LI Fengjin. Application of deconvolution in early time test data processing [J]. Well Testing, 2010, 19(5): 48-50.
- [6] 陈伟,朱礼斌,方全堂. 试井早期资料解释方法[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 17-19.
CHEN Wei, ZHU Libin, FANG Quantang. Interpretation method for early time data of well test [J]. Well Testing, 2009, 18(4): 17-19.
- [7] 魏聪,陈宝新,刘敏,等. 基于反褶积技术的 S 气井不稳定试井解释[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 73-78.
WEI Cong, CHEN Baoxin, LIU Min *et al.* Interpretation of pressure transient well testing data of S gas well based on deconvolution technique [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 73-78.
- [8] 林加恩,张连仲,韩凤蕊,等. 多级变流量直接综合试井分析的新方法[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 99-101.
LIN Jiaen, ZHANG Lianzhong, HAN Fengrui *et al.* A new method of directly comprehensive well test interpretation of multiple variable flow rate [J]. Petroleum Geology and Recovery, 2006, 13(4): 99-101.
- [9] 宋红伟,郭海敏,戴家才. 变流量生产测井在确定动态地层参数中的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(7): 80-84.
SONG Hongwei, GUO Haimin, DAI Jiakai. Determining dynamic formation parameter through variable flow-rate production logging [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(7): 80-84.
- [10] 刘能强. 反褶积及其应用[J]. 油气井测试, 2007, 16(5): 1-4.
LIU Nengqiang. Deconvolution and its application [J]. Well Testing, 2007, 16(5): 1-4.
- [11] GRINGARTEN A C. From straight lines to deconvolution: the evolution of the state of the art in well test analysis [C]. SPE 102079, 2008.
- [12] SCHROETER T, HOLLAENDER F, GRINGARTEN A. Deconvolution of well test data as a nonlinear total least squares problem [J]. SPE Journal, 2004, 9(9): 375-390.
- [13] LEVITAN M. Practical applications of pressure/rate deconvolution to analysis of real well tests [C]. SPE 84290, 2003.
- [14] LEVITAN M, CRAWFORD G E, ANDREW H. Practical considerations for pressure rate deconvolution of well test data [C]. SPE 90680, 2004.
- [15] 任超群,李文红,李树松. 反褶积试井解释技术在南海

- 西部油气田中的应用与实践[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 22-24.
- REN Chaoqun, LI Wenhong, LI Shusong. Application and practice of deconvolution well testing interpretation technology in oil and gas field of the Western China Sea [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 22-24.
- [16] 周照静, 鲁秀芹, 高晓成, 等. 反褶积试井解释方法在低渗透气藏中的应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 36-38.
- ZHOU Zhaojing, LU Xiuqin, GAO Xiaocheng *et al.* Application of deconvolution well test technology in low permeability gas reservoir [J]. Well Testing, 2017, 26(5): 36-38.
- [17] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 242-247.
- KONG Xiangyan. Advanced fluid mechanics in porous medium [M]. Anhui: University of Science and Technology of China Press, 1999: 242-247.
- [18] OPPENHEIM A V, WILLSKY A S, HAMID W S. Signals and systems second edition [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 96-98.
- [19] 郑君里, 应启珩, 杨为理, 等. 信号与系统(下册)[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 35-36.
- ZHENG Junli, YING Qiheng, YANG Weili *et al.* Signal and system [M]. second edition. Beijing: Higher Education Press, 2000: 35-36.
- [20] GRINGARTEN AC, RAMEY HJ Jr. The use of source and Green's functions in solving unsteady-flow problems in reservoir [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1973, 13(5): 285-296.
- [21] 胡一波, 王宇平. 解约束优化问题的一种新的罚函数模型[J]. 计算机科学, 2009, 36(7): 240-242.
- HU Yibo, WANG Yuping. New penalty model for constrained optimization problems [J]. Computer Science, 2009, 36(7): 240-242.
- [22] 林丹, 李敏强, 寇纪淞. 基于遗传算法求解约束优化问题的一种算法[J]. 软件学报, 2001, 12(4): 628-632.
- LIN Dan, LI Minqiang, KOU Jisong. A ga-based method for solving constrained optimization problems [J]. Journal of Software. 2001, 12(4): 628-632.
- [23] 小罗伯特 C. 厄洛赫. 试井分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985: 47-48.
- ROBERT C, EARLOUGHER J R. Advances in well test analysis [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985: 47-48.
- [24] 王薇, 徐以凡. 无约束极值问题的拟合方法[J]. 运筹学学报, 2003, 7(1): 46-52.
- WANG Wei, XU Yifan. A fitting method for unconstrained minimizations [J]. Operations Research Transactions, 2003, 7(1): 46-52.
- [25] SAMUELSSON C. Comparative evaluation of the stochastic simplex bisection algorithm and the SciPy. Optimize module [C]//Computer Science and Information Systems. IEEE, 2015: 573-578.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 孟宪伟, 男, 1984 年出生, 硕士, 工程师, 2010 年毕业于中国石油勘探开发研究院油气田开发专业, 现主要从事油气田开发方面研究工作。电话: 022-66501625, 15122162784; Email: mengxw@cnooc.com.cn。地址: 天津市滨海新区塘沽海川路 2121 号渤海石油管理局 A 座, 邮政编码: 300459。