

## 响应面法和 BFGS 算法在试井分析中的应用

李道伦, 陈刚, 查文舒, 许恩华

(合肥工业大学数学学院, 安徽合肥 236009)

**摘要:** 试井分析是利用关井所测的井底压力随时间变化的资料来分析地层和井筒参数, 是一个典型的反问题. 基于响应面法提出了一种新的参数自动反求的数值试井解释方法. 选定不确定参数及其范围, 确定试算算例, 然后利用拟合方法得到多项式逼近函数, 即构造响应面模型. 利用响应面模型构建计算值与实际观测值偏差的目标函数, 再利用 BFGS 算法以及拉丁超立方抽样搜索目标函数的最小值, 得到不确定参数值. 算例表明该方法能有效地对井底压力以及压力导数进行拟合, 因而具有很好的应用前景.

**关键词:** 试井分析; 响应面法; 目标函数; BFGS 算法; 拉丁超立方抽样

**中图分类号:** TE312 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.05.009

**引用格式:** 李道伦, 陈刚, 查文舒, 等. 响应面法和 BFGS 算法在试井分析中的应用[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(5): 400-408.

LI Daolun, CHEN Gang, ZHA Wenshu, et al. Application of response surface method and bfgs algorithm in well test analysis[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(5): 400-408.

## Application of response surface method and BFGS algorithm in well test analysis

LI Daolun, CHEN Gang, ZHA Wenshu, XU Enhua

(School of Mathematics, Hefei University of Technology, Hefei 236009, China)

**Abstract:** Well test analysis is a typical inverse problem that analyzes the formation and wellbore parameters using the time-varying data of the bottom hole pressure measured during shut-in. Based on the response surface method, a new method for automatically evaluating parameters was presented to solve the numerical well test interpretation. Select the uncertain parameters and their scope, the experimental examples were determined, and then the polynomial approximation function was obtained by matching method, that is, constructing the response surface model. Using the response surface model, the objective function of the deviation between the calculated value and the actual observation value was constructed. The minimum value of the objective function was obtained by using the BFGS algorithm and the Latin hypercube sampling to obtain the uncertain parameter value. The numerical examples show that the method can effectively match the bottom hole pressure and the pressure derivative, and thus has a good potential for application.

**Key words:** well test analysis; response surface method; objective function; BFGS algorithm; Latin hypercube sampling

收稿日期: 2017-06-26; 修回日期: 2017-12-07

基金项目: 中国石油-中国科学院战略合作项目(2015A-4812), 中国科学院战略性先导科技专项(XDB10030402)资助

作者简介: 李道伦(通讯作者), 男, 1972年生, 博士/教授. 研究方向: 数值试井和油藏数值模拟. E-mail: LdaoL@ustc.edu.cn

## 0 引言

在石油开采过程中会遇到一些工程问题,比如如何估计油井的产量等.这就需要建立可靠的地质模型,才能进一步进行预测,因而需要知道油藏地层及井筒参数.试井是油藏开发过程中获得地层及井筒参数的最常用方法.一般来说,试井分析就是以实测井底压力、温度或流量为基本数据分析和推算地层及井筒参数,从而为描述油藏动态特性和中长期产能预测、产能优化服务.

数值试井<sup>[1-3]</sup>是近年来发展起来的一项新的试井解释技术,它是通过大量的数学模拟运算来精确描述物理过程的数值模拟技术.数值试井所描述的油藏特征更真实,应用面更宽.但数值试井也面临着一系列的困难,计算参数多,计算时间长.由于缺乏有效的自动反演方法,在数值试井解释中,解释人员需要手动调节不确定参数,使计算压力与实测压力尽可能地接近.解释一口井或井组可能要花费几周甚至几个月的时间.为了减少人员工作强度,需要发展参数自动反演的方法,从而大大提高数值试井解释的效率.

试井分析类似于油藏工程中历史拟合<sup>[4]</sup>,其本质就是求解地层参数,这是一个反问题.反问题常常是多解的,也就是说可能有很多种物性参数的组合都可以得到类似的结果.油藏历史拟合是油藏数值模拟中必不可少的一部分,它是获得多个可靠油藏模型并加以预测的一个有效途径.

传统历史拟合,也就是所谓的人工历史拟合,通过“试错”的方法来进行,即油藏工程师凭借自己的经验,对模拟计算值与实际观测值之间的差距进行分析,修改一个或多个参数,从而减小误差.这种方式效率低下,为此自动历史拟合方法得到迅速发展.

油藏自动历史拟合<sup>[5-6]</sup>方法之一是要构造模拟器的逼近模型,然后基于逼近模型找到一组模型参数,利用这组参数使得计算值和实际观测值的差异最小.

响应面法<sup>[7]</sup>(response surface method, RSM)是数学方法和统计方法结合的产物,可对多个变量的问题进行建模和分析.它囊括了实验设计、数学建模、检验模型的合适性、寻求最佳组合条件等众多技术;通过对过程的回归拟合和响应曲面、等高线的绘制,可方便地求出相应于各因素水平的响应值.在各因素水平的响应值的基础上,可以找出预测的响

应最优值以及相应的实验条件.其最终目的是构造一个响应与多个变量关系的显式表达式.基本思想是通过构造一个具有明确表达形式的多项式来局部逼近模拟器.20世纪90年代,响应面法被引入油藏工程<sup>[8-10]</sup>,通过响应面法构造响应面模型并定义反映模拟计算值与实测值之间偏差的目标函数<sup>[11]</sup>.

自动历史拟合是利用计算机,采用优化算法,自动调整油藏模型参数,使得模拟油藏模型尽可能逼近真实油藏模型.在所应用的优化算法中,大致可以分为两类:基于梯度的优化算法和进化类算法.梯度类算法通过对目标函数中未知参数求导的方式来搜索最优值,比如高斯牛顿法<sup>[12]</sup>,共轭梯度法<sup>[13]</sup>,BFGS算法<sup>[14-15]</sup>等.虽然这类算法速度快,但也面临着两个缺点:第一,当参数众多时,很难保证收敛性;第二,对于高度非线性的复杂模型而言,容易陷入局部最优.

为了解决这些问题,一系列随机全局优化算法得到发展,比如:模拟退火算法<sup>[16]</sup>,隧道算法<sup>[17]</sup>,遗传算法<sup>[18-19]</sup>等.虽然这些算法在全局最优上得到了改进,但在收敛速度上仍难以让人满意.

降低多解性一直是反问题求解中的难题.这难以用数学方法进行解决.目前,增加约束条件是降低多解性的有效方法.现有的试井方法往往增加测井数据、沉积相带图或生产数据等进行更多约束,从而降低多解性<sup>[20]</sup>.

为此本文基于响应面法、BFGS算法以及拉丁超立方抽样<sup>[21-22]</sup>,提出了一种自动反求参数的试井分析方法,对试井数据进行模拟,经过验证,该方法有效.

## 1 理论背景

### 1.1 试井分析评价的目标函数

在试井分析中,地层和井筒参数是待求的,而井底压力是实测的、已知的,需要通过“试凑”找到一组合适的“地层和井筒参数”,使得在这组“地层和井筒参数”下,渗流方程的计算压力与实测压力相等或尽可能接近.因而,试井分析的过程就是找合适的“地层和井筒参数”的过程,这是一个反问题.利用关井所测的井底压力随时间变化的资料来分析地层和井筒参数.因此可以定义一个反映模拟计算值与实测值之间偏差的目标函数  $OF$ .

目标函数  $OF$  通常用一个简单的平方和的形式来表示.定义如下:

$$OF = \sum_{j=1}^n \omega_j [D_{\text{obs}}^j - D_{\text{sim}}^j(x)]^2 \quad (1)$$

式中,  $j$  表示实测数据(压力、压力变化、压力导数)时间点的序号,  $n$  表示实测数据时间点的总数目,  $D_{\text{obs}}^j$  和  $D_{\text{sim}}^j(x)$  分别表示实测数据值和响应面模型,  $x$  表示不确定参数,  $\omega_j$  表示实测数据第  $j$  时间点的权重。

### 1.2 响应面建模方法

通常,工程师们假设一个响应  $y$  与多个变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  之间存在某种关系,这种关系可以表示为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \epsilon \quad (2)$$

这里  $f$  是未知的响应函数,  $\epsilon$  表示误差项.对许多建模研究而言,二阶多项式模型是最佳的选择,二阶多项式模型包含常数项、一次项、平方项以及交叉项.通常可以表示为

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3)$$

为了方便,这个模型可以由矩阵的形式来表示:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \epsilon \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{X}$  是一个  $n \times p$  的矩阵,  $\mathbf{y}$  是一个  $n \times 1$  的响应向量,  $\boldsymbol{\beta}$  是一个  $p \times 1$  的系数向量,  $n$  表示实验次数,  $p$  表示所有项数之和(包含常数项).响应面法通常假设误差向量是一个服从均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的正态分布的随机向量.在这个假设下,可得到

$$E(\mathbf{y}) = \boldsymbol{\eta} = E(\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) = \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{b}$  是  $\boldsymbol{\beta}$  的一个无偏估计,最常见的估计是最小二乘估计.如果存在估计误差  $\mathbf{e} = \mathbf{X}\mathbf{b} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$ , 设损失函数为  $L$ , 则不正确的响应所导致的损失函数为

$$L = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{e} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{b}) \quad (6)$$

最小二乘估计必须满足  $\frac{\partial L}{\partial \mathbf{b}} = 0$ . 因此,  $\mathbf{b}$  的表达

式如下:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (7)$$

### 1.3 BFGS 算法

BFGS 算法是一种梯度类优化算法,用于搜索函数的极值点.下面给出 BFGS 算法的推导过程.

由牛顿法和拟牛顿条件可知:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mathbf{H}_k^{-1} \cdot \mathbf{g}_k \quad (8)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_{k+1} \cdot \mathbf{s}_k \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{H}_k$  是海森矩阵,  $\mathbf{g}_k$  是函数  $f(\mathbf{x})$  在  $\mathbf{x}_k$  处的梯度,  $\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$ ,  $\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k$ .

BFGS 算法的基本思想是构造一个矩阵直接逼近海森矩阵,即  $\mathbf{B}_k \approx \mathbf{H}_k$ . 设迭代格式为

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \Delta \mathbf{B}_k, k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{B}_0$  也常取为单位矩阵  $\mathbf{I}$ . 因此,关键是每一步的校正矩阵  $\Delta \mathbf{B}_k$  如何构造.将其待定为

$$\Delta \mathbf{B}_k = \boldsymbol{\alpha} \mathbf{u} \mathbf{u}^T + \boldsymbol{\beta} \mathbf{v} \mathbf{v}^T \quad (11)$$

将式(11)带入式(10)并结合式(9),可得

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k + (\boldsymbol{\alpha} \mathbf{u}^T \mathbf{s}_k) \mathbf{u} + (\boldsymbol{\beta} \mathbf{v}^T \mathbf{s}_k) \mathbf{v} \quad (12)$$

令  $\boldsymbol{\alpha} \mathbf{u}^T \mathbf{s}_k = 1$ ,  $\boldsymbol{\beta} \mathbf{v}^T \mathbf{s}_k = -1$ ,  $\mathbf{u} = \mathbf{y}_k$ ,  $\mathbf{v} = \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k$ , 可得

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{1}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}, \boldsymbol{\beta} = -\frac{1}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k} \quad (13)$$

综上,便可得到如下校正矩阵  $\Delta \mathbf{B}_k$  的公式:

$$\Delta \mathbf{B}_k = \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k} \quad (14)$$

从而  $\mathbf{B}_k$  的迭代公式为

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k} \quad (15)$$

下面给出 BFGS 算法的一个完整算法描述:

- ① 给定初值  $\mathbf{x}_0$  和精度阈值  $\epsilon$ , 并令  $\mathbf{B}_0 = \mathbf{I}$ ,  $k = 0$ ;
- ② 确定搜索方向  $\mathbf{p}_k = -\mathbf{B}_k^{-1} \cdot \mathbf{g}_k$ ;
- ③ 利用线性搜索方法得到步长  $\alpha_k$ , 令  $\mathbf{s}_k = \alpha_k \mathbf{p}_k$ ;  $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{s}_k$ ;
- ④ 若  $\|\mathbf{g}_{k+1}\| < \epsilon$ , 则算法结束;
- ⑤ 计算  $\mathbf{y}_k = \mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k$ ;
- ⑥ 计算  $\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{B}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k}$ ;
- ⑦ 令  $k = k + 1$ , 转至步②.

上述算法中的步②通常是通过求解线性方程组  $\mathbf{p}_k \mathbf{B}_k = -\mathbf{g}_k$  来进行.然而,更一般的做法是,通过对步⑥中的递推关系应用 Sherman-Morrison 公式,直接给出  $\mathbf{B}_{k+1}^{-1}$  与  $\mathbf{B}_k^{-1}$  之间的关系式:

$$\mathbf{B}_{k+1}^{-1} = (\mathbf{I} - \frac{\mathbf{s}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}) \mathbf{B}_k^{-1} (\mathbf{I} - \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k}) + \frac{\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} \quad (16)$$

进一步展开可得到

$$\mathbf{B}_{k+1}^{-1} = \mathbf{B}_k^{-1} + \frac{(\mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k + \mathbf{y}_k^T \mathbf{B}_k^{-1} \mathbf{y}_k)(\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T)}{(\mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k)^2} - \frac{\mathbf{B}_k^{-1} \mathbf{y}_k \mathbf{s}_k^T + \mathbf{s}_k \mathbf{y}_k^T \mathbf{B}_k^{-1}}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{y}_k} \quad (17)$$

### 1.4 拉丁超立方抽样

由于 BFGS 算法是局部最优算法,搜索最小值依赖于初始点.所以本文加入了拉丁超立方抽样,随机生成多组初始点.初始点的范围覆盖整个变量区

间,这样就能保证搜索到最小值。

拉丁超立方抽样是被设计成通过较少迭代次数的抽样,准确地重建输入分布。拉丁超立方抽样的关键是对输入概率分布进行分层。分层在累积概率尺度(0~1.0)上把累积曲线分成相等的区间,然后,从输入分布的每个区间或“分层”中随机抽取样本。此采样方案不需要更多的样本用于更多维度(变量),这种独立性是该抽样方案的主要优点。

简单地说就是,假设要在  $n$  维向量空间里抽取  $m$  个样本,拉丁超立方抽样的步骤是:

①将每一维分成互不重叠的  $m$  个区间,使得每个区间有相同的概率(通常考虑一个均匀分布,这样区间长度相同);

②在每一维中的每一个区间中随机地抽取一个点;

③再从每一维中随机抽出②中选取的点,将它们组成向量。

### 1.5 方法流程

①确定试井分析不确定参数及其范围;

②利用拉丁超立方抽样确定 1000 组试算算例;

③利用试井软件对每组算例进行计算,得到对应的压力、压力变化、压力导数数据;

④利用最小二乘法对试算数据进行拟合,构造多个响应面模型;

⑤定义试井分析评价的目标函数;

⑥利用 BFGS 算法和拉丁超立方抽样对目标函数进行优化,求得一组不确定参数值;

⑦将⑥中的不确定参数值带入数值试井软件计算压力值,与真实压力值对比,如果满足误差,计算结束,否则返回步①。

## 2 案例研究

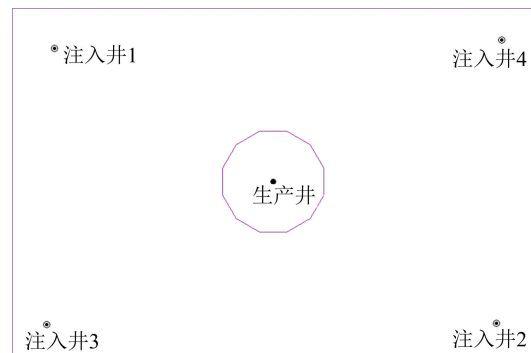
### 2.1 模型描述与计算

这里采用的是五点井网模型,如图 1(a)所示。油藏大小为  $600\text{ m} \times 400\text{ m}$ ,厚度为  $10\text{ m}$ ,孔隙度为  $0.2$ ,中间为一口生产井,四角为四口注入井。生产井周围是一个复合区域,生产井开井时间为  $240\text{ d}$ ,产量为  $80\text{ m}^3/\text{d}$ ,关井时间为  $3\text{ d}$ 。四口注入井均为注入  $240\text{ d}$ ,关井  $3\text{ d}$ 。注入井 1~4 流量的注入量流量分别为  $20, 30, 10, 20\text{ m}^3/\text{d}$ 。

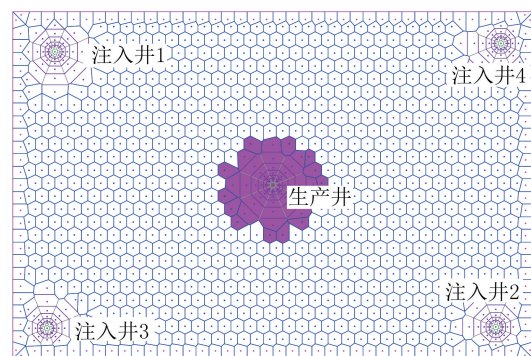
为验证数值试井参数自动调整方法的有效性,设油与水的黏度、体积系数相等,且相渗曲线是斜率为 1 的直线,因而每一饱和度下的相对渗透率为 1。

因而,这里的两相流等效为单相流。

采用 PEBI 网格划分技术,网格如图 1(b)所示。



(a) 油藏形状及井分布



(b) 网格

图 1 油藏形状及网格划分

Fig.1 Reservoir and distribution of wells and gridding

所选定的 4 个不确定参数分别为:地层渗透率  $K$ ,范围是(100 mD, 700 mD);复合区域渗透率  $K_1$ ,范围是(100 mD, 700 mD);生产井井筒存储  $C$ ,范围是(0.1  $\text{m}^3/\text{MPa}$ , 1.0  $\text{m}^3/\text{MPa}$ );生产井表皮因子  $S$ ,范围是(-3, 3)。本文在以注采平衡为前提下进行研究,对生产井的井底压力恢复曲线、压力变化及其导数双对数曲线进行拟合。

首先利用拉丁超立方抽样确定 1000 组试算算例,将每一组试算算例带入数值试井模拟器进行计算,得到对应的压力值。将 1000 组试算算例的第一组算例作为真实值,利用 996 组算例基于响应面法来构造多个响应面模型并定义目标函数  $OF$ 。

得到目标函数  $OF$  之后,利用拉丁超立方抽样取得 20 组初始点。经过 BFGS 算法的优化,求得不确定参数的估算值。目标函数  $OF$  的迭代如图 2 所示。不确定参数的估算值与真实值的对比如表 1 所示。再将估算值和真实值带入数值试井模拟器中,可得到井底压力恢复曲线对比图(图 3(a))、压力变化及其导数对比图(图 3(b))。可见响应面方法能准确地反演出地层参数及井筒参数。

表 1 不确定参数的计算结果

Tab.1 Calculation results of the uncertain parameters

参数名称	$K/mD$	$K_1/mD$	$C/(m^3 \cdot (MPa)^{-1})$	$S$
真实值	165.044	159.03	0.867 3	-1.818
估算值	165.386	157.253	0.849 4	-1.831
误差	0.342	1.777	0.179	0.0126

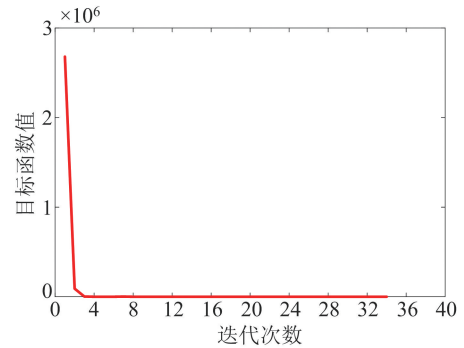
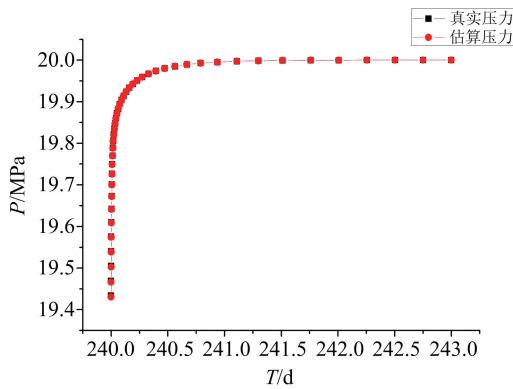
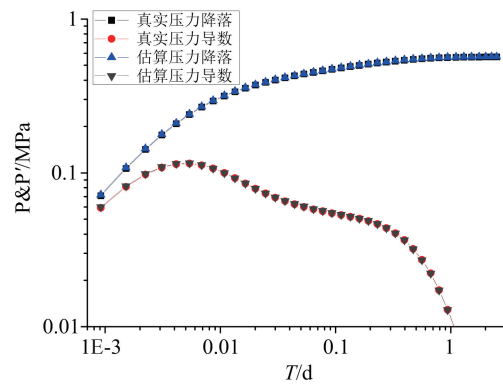


图 2 目标函数值随迭代次数变化情况

Fig.2 Objective function value changing with iteration



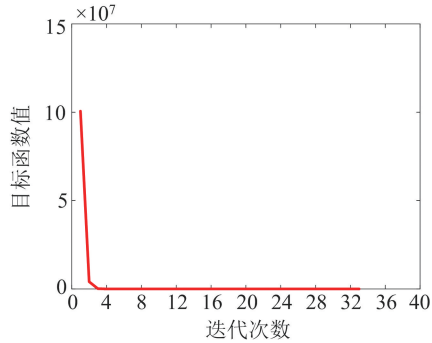
(a) 井底压力对比图



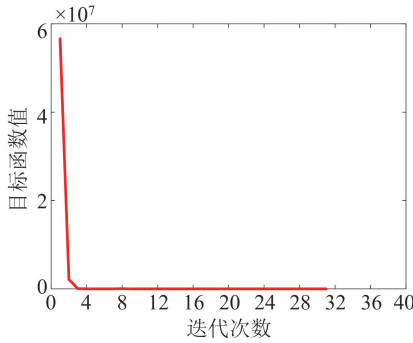
(b) 压力变化及其导数对比图

图 3 第一组为真值时,基于响应面方法的自动拟合结果对比

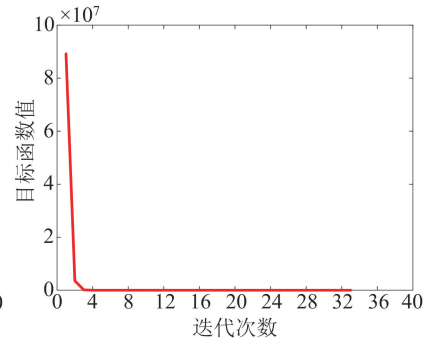
Fig.3 When the first group is true value, the results of the automatic matching based on the response surface



(a) 第二组为真值



(b) 第三组为真值



(c) 第四组为真值

图 4 其余三组参数下的目标函数值随迭代次数变化情况

Fig.4 Objective function value changing with iteration of the remaining three sets of uncertain parameters

以同样的方式,分别将第二组、第三组和第四组算例作为真实值,求得不确定参数估算值.可得到不确定参数的估算值与真实值的计算结果对比(表 2)、目标函数  $OF$  的迭代图(图 4)、井底压力恢复曲线对比图(图 5(a)、图 6(a)、图 7(a))、压力变化及其导数对比图(图 5(b)、图 6(b)、图 7(b)).这些表明本文方法迭代速度快,拟合效果好.

表 2 其余三组不确定参数的计算结果

Tab.2 Calculation results of the remaining three sets of uncertain parameters

参数名称	$K/mD$	$K_1/mD$	$C/(m^3 \cdot (MPa)^{-1})$	$S$
真实值	109.119	124.652	0.661 8	1.783 3
估算值	109.219	125.516	0.691 6	1.784 2
真实值	137.518	106.599	0.331 0	-2.356
估算值	137.879	105.535	0.323	-2.398
真实值	126.712	163.765	0.688 8	0.516 5
估算值	126.183	165.806	0.704 5	0.539 1
平均误差	0.33	1.323	0.017 9	0.052

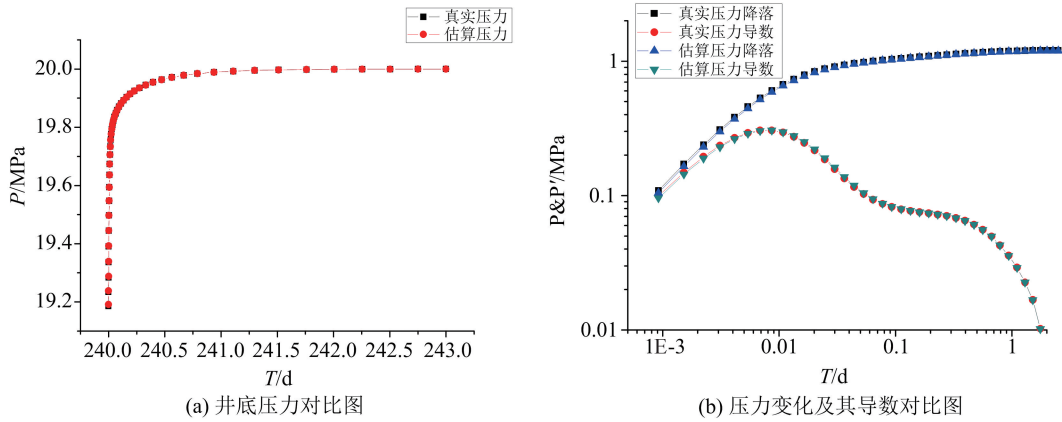


图 5 第二组为真值时,基于响应面方法的自动拟合结果对比

Fig.5 When the second group is true value, the results of the automatic matching based on the response surface

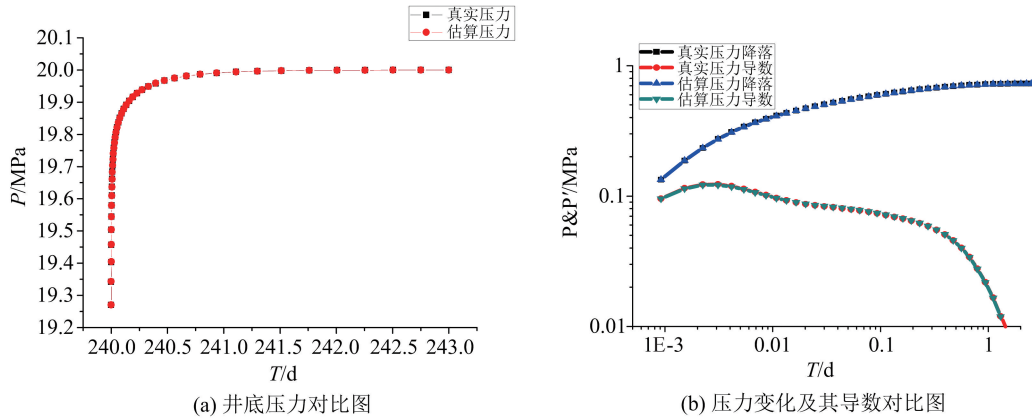


图 6 第三组为真值时,基于响应面方法的自动拟合结果对比

Fig.6 When the third group is true value, the results of the automatic matching based on the response surface

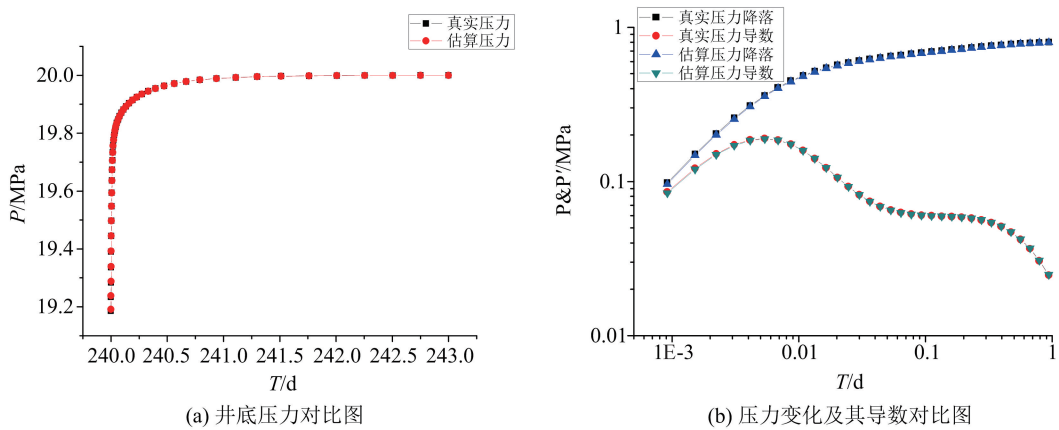


图 7 第四组为真值时,基于响应面方法的自动拟合结果对比

Fig.7 When the fourth group is true value, the results of the automatic matching based on the response surface

### 2.2 多解性研究

为验证本文方法的多解性,增大上述模型中的复合区域面积,如图 8 所示。

采用与节 2.1 所述步骤,选定同样的不确定参数及其范围,利用拉丁超立方抽样确定 1000 组试算算例,将每一组试算算例带入数值试井模拟器进行

计算,得到对应的压力值.利用该 1000 组算例基于响应面法来构造多个响应面模型并定义新目标函数  $OF$ 。

将节 2.1 中所述算例的 4 组真实值带入  $OF$ ,经过 BFGS 算法计算可得到不确定参数的估算值,不确定参数的估算值与真实值的对比如表 3 所示。

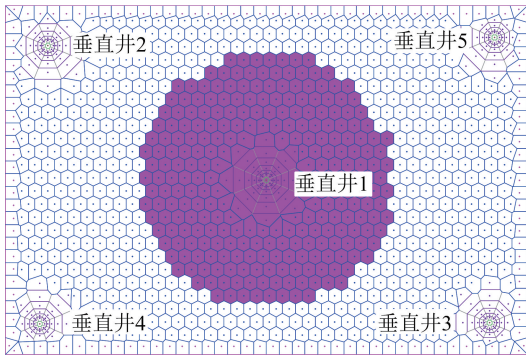


图 8 对比模型网格

Fig.8 Gridding of contrast model

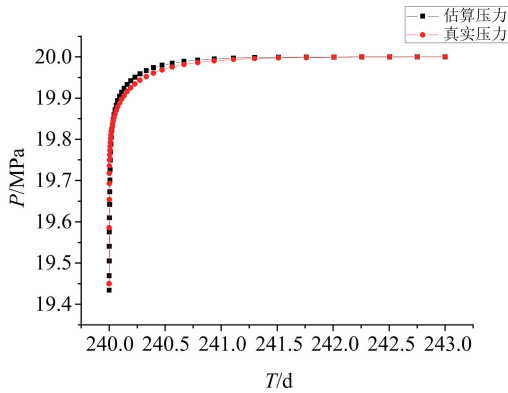
再将估算值和真实值带入数值试井模拟器中, 可得到井底压力恢复曲线对比图(图 9(a)、图 10(a)、图 11(a)、图 12(a))、压力变化及其导数对比图(图 9(b)、图 10(b)、图 11(b)、图 12(b)). 由图 9~12 可知, 当模型不正确时, 自动拟合的结果与真实结果

有明显的差异, 这说明本文方法不会增加多解性. 需要说明的是, 多解性是众多反问题求解中共同面临的难题. 需要降低多解性还需要更多的约束条件, 如测井数据、沉积相带图等.

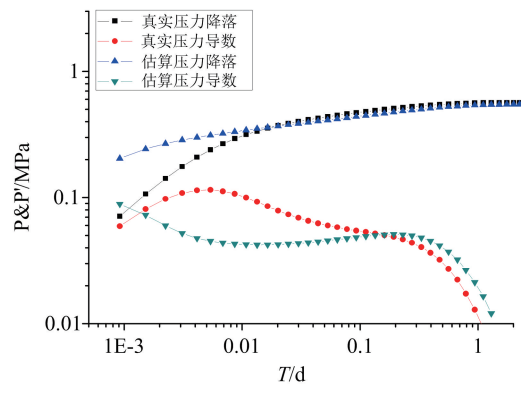
表 3 错误模型下的不确定参数的计算结果

Tab.3 Calculation results of the uncertain parameters under incorrect model

参数名称	$K/mD$	$K_1/mD$	$C/m^3 \cdot (MPa)^{-1}$	$S$
真实值	165.044	159.03	0.867 29	-1.818
估算值	132.19	199.526	0.1	-1.265
真实值	109.119	124.652	0.661 8	1.783 3
估算值	100	138.038 4	1	3.0
真实值	137.518	106.599	0.331 0	-2.356
估算值	100	132.678	1	-0.05
真实值	126.712	163.765	0.688 8	0.516 5
估算值	100	199.526	0.1	1.388 4
平均误差	26.551	28.931	0.591	1.237



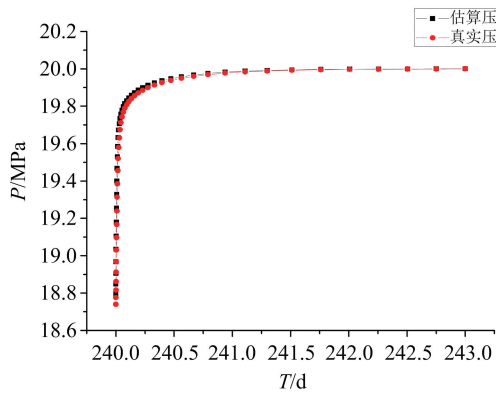
(a) 井底压力对比图



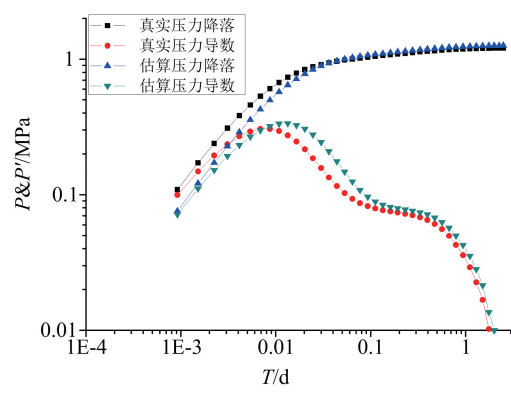
(b) 压力变化及其导数对比图

图 9 当模型不正确时, 第一组为真值时的自动拟合结果

Fig.9 When the first group is true value, the automatic matching results based on the incorrect model



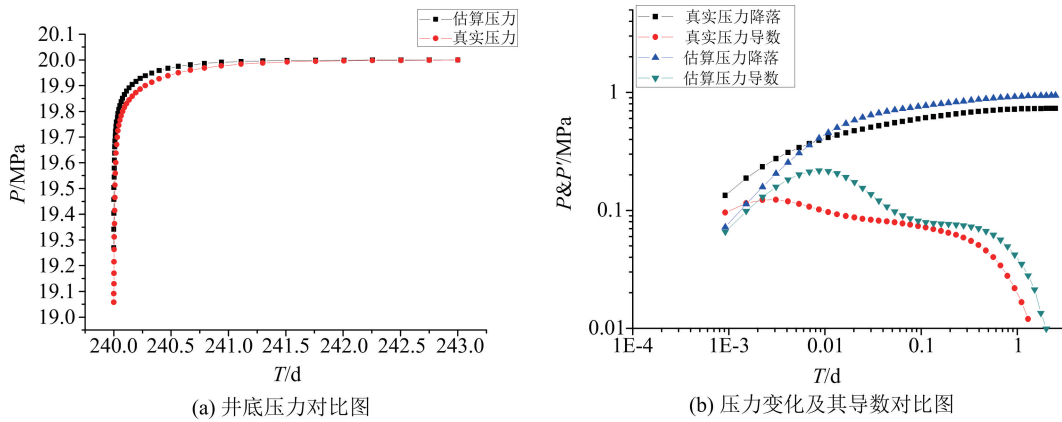
(a) 井底压力对比图



(b) 压力变化及其导数对比图

图 10 当模型不正确时, 第二组为真值时的自动拟合结果

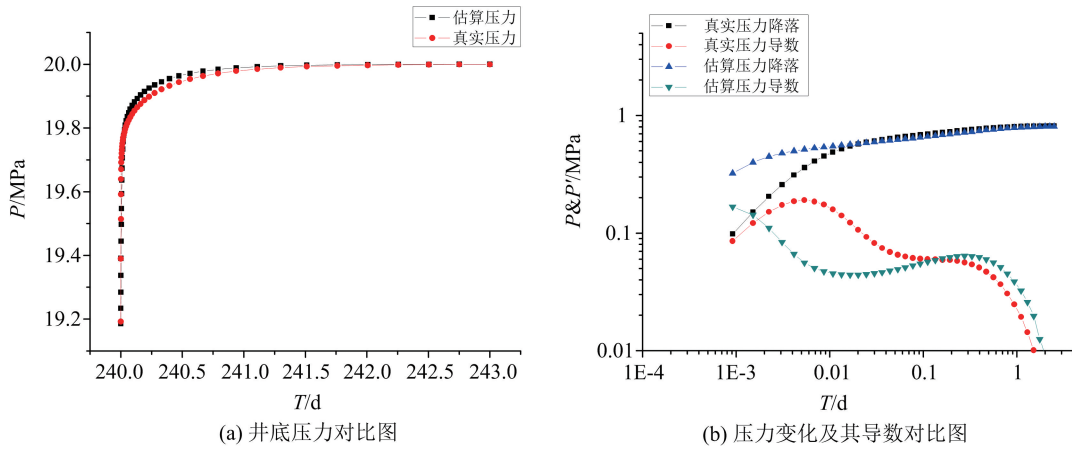
Fig.10 When the second group is true value, the automatic matching results based on the incorrect model



(a) 井底压力对比图 (b) 压力变化及其导数对比图

图 11 当模型不正确时,第三组为真值时的自动拟合结果

Fig.11 When the third group is true value, the automatic matching results based on the incorrect model



(a) 井底压力对比图 (b) 压力变化及其导数对比图

图 12 当模型不正确时,第四组为真值时的自动拟合结果

Fig.12 When the fourth group is true value, the automatic matching results based on the incorrect model

### 3 结论

本文基于响应面法和 BFGS 算法以及拉丁超立方抽样提出了一种自动数值试井解释方法.对试井软件合成的五点井网油藏模型进行模拟与验证,取得了良好的效果.相关结论如下:

(I) 基于响应面方法与优化方法能有效进行数值试井自动拟合;

(II) BFGS 算法和拉丁超立方抽样的结合能快速地找到最优值;

(III) 该方法将能有效降低试井解释人员的工作强度,具有应用前景.

本文只是研究的初步结果,后面还须进行深入研究,并结合多段压裂水平井进行实际效果验证.

#### 参考文献 (References)

[ 1 ] LI Daolun, ZHA Wenshu, LIU Shufeng, et al. Pressure transient analysis of low permeability reservoir with

pseudo threshold pressure gradient[J]. J Petrol Science and Engineering, 2016, 147: 308-316.

[ 2 ] LI Daolun, ZHANG Longjun, LU Detang. Effect of distinguishing apparent permeability on flowing gas composition, composition change and composition derivative in tight- and shale-gas reservoir[J]. J Petrol Science and Engineering, 2015, 128: 107-114.

[ 3 ] 李道伦, 查文舒. 数值试井理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.

[ 4 ] OLIVER D S, CHEN Y. Recent progress on reservoir history matching: A review [ J ]. Computational Geosciences, 2011, 15(1): 185-221.

[ 5 ] 闫霞, 张凯, 姚军, 等. 油藏自动历史拟合方法研究现状与展望[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(4): 69-73.

YAN Xia, ZHANG Kai, YAO Jun, et al. Review on automatic history matching methods for reservoir simulation [ J ]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(4): 69-73.

[ 6 ] 张凯, 路然然, 周文胜, 等. 无梯度多参数自动历史拟合方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 109-115.



- ZHANG Kai, LU Ranran, ZHOU Wensheng, et al. Multi-parameter gradient-free automatic history matching method [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(5): 109-115.
- [7] KHURI A I, MUKHOPADHYAY S. Response surface methodology [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2010, 2(2): 128-149.
- [8] DEJEAN J P, BLANC G. Managing uncertainties on production predictions using integrated statistical methods [C]// *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [9] MANCEAU E, MEZGHANI M, ZABALZA-MEZGHANI I, et al. Combination of experimental design and joint modeling methods for quantifying the risk associated with deterministic and stochastic uncertainties: An integrated test study [C]// *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [10] DEGHAN MONFARED A, HELALIZADEH A, PARVIZI H. Automatic history matching using the integration of response surface modeling with a genetic algorithm [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2012, 30(4): 360-374.
- [11] BERTOLINI A C, SCHIOZER D J. Influence of the objective function in the history matching process [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 78(1): 32-41.
- [12] THOMAS L K, HELLUMS L J, REHEIS G M. A nonlinear automatic history matching technique for reservoir simulation models [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1972, 12(6): 508-514.
- [13] CHEN W H, GAVALAS G R, SEINFELD J H, et al. A new algorithm for automatic history matching [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974, 14(6): 593-608.
- [14] KOLDA T G, O'LEARY D P, NAZARETH L. BFGS with update skipping and varying memory [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 1998, 8(4): 1060-1083.
- [15] ZHANG F, REYNOLDS A C. Optimization algorithms for automatic history matching of production data [C]// *ECMOR VIII-8th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*. Houten, The Netherlands: European Association of Geoscientists & Engineers, 2002.
- [16] OUEDES A, BREFORT B, MEUNIER G, et al. A new algorithm for automatic history matching: Application of simulated annealing method (SAM) to reservoir inverse modeling [R]. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1993.
- [17] GOMEZ S, GOSSELIN O, BARKER J W. Gradient-based history-matching with a global optimization method [C]// *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [18] XAVIER C R, DOS SANTOS E P, DA FONSECA VIEIRA V, et al. Genetic algorithm for the history matching problem [J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 18: 946-955.
- [19] ZHANG X, HOU J, WANG D, et al. An automatic history matching method of reservoir numerical simulation based on improved genetic algorithm [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 29: 3924-3928.
- [20] 闫术, 李道伦, 王磊. 基于多井试井解释的数值试井方法及其应用 [J]. *油气井测试*, 2013, 22(1): 27-31.
- YAN Shu, LI Daolun, WANG Lei. Method of multi well test and its application [J]. *Well Testing*, 2013, 22(1): 27-31.
- [21] IMAN R L. Latin hypercube sampling [J]. *Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment*, 2008: DOI: 10.1002/9780470061596.risk0299.
- [22] MONFARED A D, HELALIZADEH A, PARVIZI H, et al. A global optimization technique using gradient information for history matching [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2014, 36(13): 1414-1428.