



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118564215 A

(43) 申请公布日 2024.08.30

(21) 申请号 202410744387.5

(22) 申请日 2024.06.11

(71) 申请人 中海石油(中国)有限公司

地址 100010 北京市东城区朝阳门北大街  
25号

申请人 中海石油(中国)有限公司北京研究  
中心

(72) 发明人 周文胜 刘晨 苏彦春 刘丕养

崔永正 张增华 蒋隽哲

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限

公司 11245

专利代理师 孙楠

(51) Int. Cl.

E21B 43/00 (2006.01)

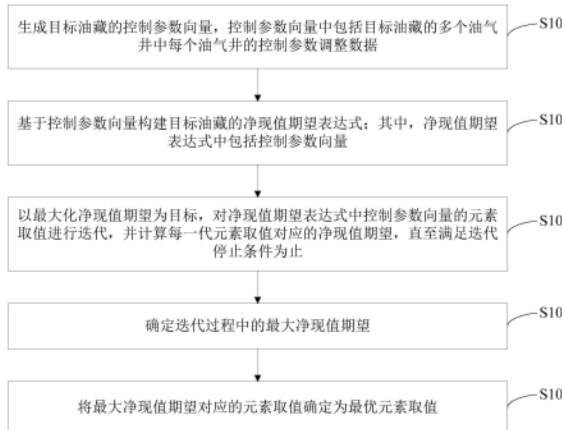
权利要求书2页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

一种油藏注采优化方法及设备

(57) 摘要

本发明涉及石油天然气开采技术领域,公开了一种油藏注采优化方法及设备,可以生成目标油藏的控制参数向量;其中,控制参数向量中包括目标油藏的多个油气井中每个油气井的控制参数调整数据。构建目标油藏的净现值期望表达式;其中,净现值期望表达式中包括控制参数向量。以最大化净现值期望为目标,对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止,并将最大净现值期望对应的元素取值确定为最优元素取值。本发明可以最大化净现值期望为目标进行油藏注采优化,确定控制参数向量的最优元素取值,丰富油藏注采优化手段。



1. 一种油藏注采优化方法,其特征在于,包括:

生成目标油藏的控制参数向量,所述控制参数向量中包括所述目标油藏的多个油气井中每个所述油气井的控制参数调整数据;

基于所述控制参数向量构建所述目标油藏的净现值期望表达式;其中,所述净现值期望表达式中包括所述控制参数向量;

以最大化净现值期望为目标,对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止;

确定迭代过程中的最大净现值期望,并将所述最大净现值期望对应的所述元素取值确定为最优元素取值。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述基于所述控制参数向量构建所述目标油藏的净现值期望表达式,包括:

基于所述控制参数向量和所述目标油藏的储层性质变量,构建所述目标油藏的净现值表达式;

根据所述目标油藏的多个储层性质和所述净现值表达式,构建所述净现值期望表达式。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述净现值期望表达式为:

$$g_Y(x) \approx \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_t} \frac{v_o Q_{oi}(x, y_j) - v_w Q_{wi}(x, y_j)}{(1+r_f)^{t_i}}$$

其中,  $g_Y(x)$  为净现值期望,  $N_e$  为所述储层性质的总数,  $j$  为所述储层性质的编号,  $N_t$  为时间步总数,  $i$  为时间步索引,  $t_i$  为自生产开始以来的累计时间,  $v_o$  和  $v_w$  分别是原油价格和水处理成本,  $Q_{oi}$  和  $Q_{wi}$  是时间步  $t_i$  内的总石油和水产量,  $y$  为所述储层性质变量,  $y_j$  为编号为  $j$  的储层性质,  $x$  为控制参数变量。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止,包括:

确定净现值期望对所述控制参数向量的敏感性近似值表达式;

根据所述目标油藏的多个储层性质和所述控制参数向量生成误差控制表达式,所述误差控制表达式用于减少所述敏感性近似值表达式的误差;

基于最快下降法和所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式,对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征在于,所述确定净现值期望对所述控制参数向量的敏感性近似值表达式,包括:

使用时间相关的高斯随机变量对所述控制参数向量中的每个所述控制参数调整数据进行扰动,以生成多个实现参数,每个所述实现参数中包括所述控制参数向量中每个所述控制参数调整数据对应的扰动后数据;

对于任一所述实现参数,确定与所述实现参数对应的地质模型,根据所述实现参数和所述地质模型计算相应的净现值,并将所述实现参数和相应的所述净现值整体作为一个待

处理元素；

对所有所述待处理元素进行排列,生成相应的实现集；

基于所述实现集确定净现值期望与所述控制参数向量间的互协方差近似值表达式,并作为所述敏感性近似值表达式。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,所述根据所述目标油藏的多个储层性质和所述控制参数向量生成误差控制表达式,包括:

根据所述多个储层性质和所述控制参数向量进行油藏数值模拟,以生成相应的伴随梯度矩阵；

对所述伴随梯度矩阵进行奇异值分解,得到相应的奇异向量；

基于所述奇异向量生成用于消除协方差伪相关性影响的局地化矩阵,并将所述局地化矩阵作为所述误差控制表达式。

7. 根据权利要求4所述的方法,其特征在于,所述基于最快下降法和所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式,对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止,包括:

将所述控制参数向量中的所述控制参数调整数据确定为所述控制参数向量的初代元素取值,根据所述初代元素取值和所述净现值期望表达式计算相应的净现值期望；

基于最快下降法、所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式和所述初始取值确定下一代元素取值,并计算相应的净现值期望；

基于最快下降法、所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式和所述下一代元素取值,确定新下一代元素取值,直至满足迭代停止条件为止。

8. 一种油藏注采优化装置,其特征在于,包括:

生成单元,用于生成目标油藏的控制参数向量,所述控制参数向量中包括所述目标油藏的多个油气井中每个所述油气井的控制参数调整数据；

构建单元,用于基于所述控制参数向量构建所述目标油藏的净现值期望表达式;其中,所述净现值期望表达式中包括所述控制参数向量；

迭代单元,用于以最大化净现值期望为目标,对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止；

第一确定单元,用于确定迭代过程中的最大净现值期望；

第二确定单元,用于将所述最大净现值期望对应的所述元素取值确定为最优元素取值。

9. 一种计算机设备,其特征在于,包括:

存储器和处理器,所述存储器和所述处理器之间互相通信连接,所述存储器中存储有计算机指令,所述处理器通过执行所述计算机指令,从而执行权利要求1至7中任一项所述的油藏注采优化方法。

10. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质上存储有计算机指令,所述计算机指令用于使计算机执行权利要求1至7中任一项所述的油藏注采优化方法。

## 一种油藏注采优化方法及设备

### 技术领域

[0001] 本发明涉及石油天然气开采技术领域,尤其涉及一种油藏注采优化方法及设备。

### 背景技术

[0002] 油藏注采优化是指在油藏开采研究中,对油藏中的注水井和采油井的相关控制参数进行优化的一种处理方式,是提高石油采收率的关键技术。

[0003] 相关技术通过油藏注采优化,可以提高油藏生产井的产量,减少油气藏开采过程中的能耗和成本,提高油田的经济效益。但是,相关技术用于实现油藏注采优化的技术手段较少。

### 发明内容

[0004] 本发明提供一种油藏注采优化方法及设备,用以解决相关技术中用于实现油藏注采优化的技术手段较少的缺陷,可以丰富油藏注采优化手段。

[0005] 第一方面,本发明提供一种油藏注采优化方法,包括:

[0006] 生成目标油藏的控制参数向量,所述控制参数向量中包括所述目标油藏的多个油气井中每个所述油气井的控制参数调整数据;

[0007] 基于所述控制参数向量构建所述目标油藏的净现值期望表达式;其中,所述净现值期望表达式中包括所述控制参数向量;

[0008] 以最大化净现值期望为目标,对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止;

[0009] 确定迭代过程中的最大净现值期望,并将所述最大净现值期望对应的所述元素取值确定为最优元素取值。

[0010] 可选的,所述基于所述控制参数向量构建所述目标油藏的净现值期望表达式,包括:

[0011] 基于所述控制参数向量和所述目标油藏的储层性质变量,构建所述目标油藏的净现值表达式;

[0012] 根据所述目标油藏的多个储层性质和所述净现值表达式,构建所述净现值期望表达式。

[0013] 可选的,所述净现值期望表达式为:

$$[0014] \quad g_Y(x) \approx \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_t} \frac{v_o Q_{o_i}(x, y_j) - v_w Q_{w_i}(x, y_j)}{(1+r_t)^{t_i}};$$

[0015] 其中,  $g_Y(x)$  为净现值期望,  $N_e$  为所述储层性质的总数,  $j$  为所述储层性质的编号,  $N_t$  为时间步总数,  $i$  为时间步索引,  $t_i$  为自生产开始以来的累计时间,  $v_o$  和  $v_w$  分别是原油价格和水处理成本,  $Q_{o_i}$  和  $Q_{w_i}$  是时间步  $t_i$  内的总石油和水产量,  $y$  为所述储层性质变量,  $y_j$  为编号为  $j$  的储层性质,  $x$  为控制参数变量。

[0016] 可选的,所述对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭

代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止,包括:

[0017] 确定净现值期望对所述控制参数向量的敏感性近似值表达式;

[0018] 根据所述目标油藏的多个储层性质和所述控制参数向量生成误差控制表达式,所述误差控制表达式用于减少所述敏感性近似值表达式的误差;

[0019] 基于最快下降法和所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式,对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止。

[0020] 可选的,所述确定净现值期望对所述控制参数向量的敏感性近似值表达式,包括:

[0021] 使用时间相关的高斯随机变量对所述控制参数向量中的每个所述控制参数调整数据进行扰动,以生成多个实现参数,每个所述实现参数中包括所述控制参数向量中每个所述控制参数调整数据对应的扰动后数据;

[0022] 对于任一所述实现参数,确定与所述实现参数对应的地质模型,根据所述实现参数和所述地质模型计算相应的净现值,并将所述实现参数和相应的所述净现值整体作为一个待处理元素;

[0023] 对所有所述待处理元素进行排列,生成相应的实现集;

[0024] 基于所述实现集确定净现值期望与所述控制参数向量间的互协方差近似值表达式,并作为所述敏感性近似值表达式。

[0025] 可选的,所述根据所述目标油藏的多个储层性质和所述控制参数向量生成误差控制表达式,包括:

[0026] 根据所述多个储层性质和所述控制参数向量进行油藏数值模拟,以生成相应的伴随梯度矩阵;

[0027] 对所述伴随梯度矩阵进行奇异值分解,得到相应的奇异向量;

[0028] 基于所述奇异向量生成用于消除协方差伪相关性影响的局地化矩阵,并将所述局地化矩阵作为所述误差控制表达式。

[0029] 可选的,所述基于最快下降法和所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式,对所述净现值期望表达式中所述控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止,包括:

[0030] 将所述控制参数向量中的所述控制参数调整数据确定为所述控制参数向量的初代元素取值,根据所述初代元素取值和所述净现值期望表达式计算相应的净现值期望;

[0031] 基于最快下降法、所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式和所述初始取值确定下一代元素取值,并计算相应的净现值期望;

[0032] 基于最快下降法、所述敏感性近似值表达式、所述误差控制表达式和所述下一代元素取值,确定新下一代元素取值,直至满足迭代停止条件为止。

[0033] 第二方面,本发明提供一种油藏注采优化装置,包括:

[0034] 生成单元,用于生成目标油藏的控制参数向量,所述控制参数向量中包括所述目标油藏的多个油气井中每个所述油气井的控制参数调整数据;

[0035] 构建单元,用于基于所述控制参数向量构建所述目标油藏的净现值期望表达式;其中,所述净现值期望表达式中包括所述控制参数向量;

[0036] 迭代单元,用于以最大化净现值期望为目标,对所述净现值期望表达式中所述控

制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止;

[0037] 第一确定单元,用于确定迭代过程中的最大净现值期望;

[0038] 第二确定单元,用于将所述最大净现值期望对应的所述元素取值确定为最优元素取值。

[0039] 第三方面,本发明提供了一种计算机设备,包括:存储器和处理器,存储器和处理器之间互相通信连接,存储器中存储有计算机指令,处理器通过执行计算机指令,从而执行上述第一方面或其对应的任一实施方式的油藏注采优化方法。

[0040] 第四方面,本发明提供了一种计算机可读存储介质,该计算机可读存储介质上存储有计算机指令,计算机指令用于使计算机执行上述第一方面或其对应的任一实施方式的油藏注采优化方法。

[0041] 本发明提供的油藏注采优化方法及设备,可以生成目标油藏的控制参数向量;其中,控制参数向量中包括目标油藏的多个油气井中每个油气井的控制参数调整数据。基于控制参数向量构建目标油藏的净现值期望表达式;其中,净现值期望表达式中包括控制参数向量。以最大化净现值期望为目标,对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止。确定迭代过程中的最大净现值期望,并将最大净现值期望对应的元素取值确定为最优元素取值。本发明可以最大化净现值期望为目标进行油藏注采优化,确定控制参数向量的最优元素取值,丰富油藏注采优化手段。

## 附图说明

[0042] 为了更清楚地说明本发明或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0043] 图1为本发明实施例提供的一种油藏注采优化方法的流程图;

[0044] 图2为本发明实施例提供的一种通过实际相关面积拟合确定 $L_x$ 和 $L_y$ 的示意图;

[0045] 图3为本发明实施例提供的一种拟合相关面积的椭圆、 $L_x$ 和 $L_y$ 的关系示意图;

[0046] 图4为本发明实施例提供的一种相关模型进行注采优化的示意图;

[0047] 图5为本发明实施例提供的一种油藏注采优化装置的结构示意图;

[0048] 图6为本发明实施例提供的一种计算机设备的结构示意图。

## 具体实施方式

[0049] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明中的附图,对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0050] 下面结合图1-图4描述本发明的油藏注采优化方法。

[0051] 如图1所示,本实施例提出第一种油藏注采优化方法,该方法可以包括以下步骤:

[0052] S101、生成目标油藏的控制参数向量,控制参数向量中包括目标油藏的多个油气井中每个油气井的控制参数调整数据。

[0053] 其中,目标油藏可以为需进行注采优化的某个油藏。

[0054] 其中,控制参数调整数据中可以包括油气井的各个控制参数在目标时段内每一次的调整数据,比如可以包括油气井的注水压力和温度在目标时段内每一次的调整数据。具体的,每一次的调整数据可以为本次数据与上一次数据的差值。

[0055] 可选的,目标时段可以为从首次开采时间点至今的时段,也可以为首次开采时间点至今时段中的部分时段。

[0056] 需要说明的是,每个油气井的控制参数调整数据中的数据个数可以是相同的。

[0057] 具体的,控制参数向量X中的元素可以为首先遍历一口井的控制参数,然后再遍历所有井得到。对于一个拥有N口井的油藏,假设每口井工作制度的调整次数为 $m_n$ ,则可以使用X表示控制变量向量,即井底流压等控制参数的调整值为坐标的向量,X中可以包含不同控制步骤的所有井约束,即每个油气井的控制参数调整数据。

$$[0058] \quad X = [x_1, x_2, \dots, x_{N_x}]。$$

[0059] 其中, $N_x$ 是所有井的控制参数的总数,则 $N_x = \sum_{n=1}^N m_n$ ,n是井的序号。

[0060] S102、基于控制参数向量构建目标油藏的净现值期望表达式;其中,净现值期望表达式中包括控制参数向量。

[0061] 可选的,步骤S102可以包括:

[0062] 基于控制参数向量和目标油藏的储层性质变量,构建目标油藏的净现值表达式;

[0063] 根据目标油藏的多个储层性质和净现值表达式,构建净现值期望表达式。

[0064] 其中,储层性质可以包括渗透率和孔隙度等。

[0065] 具体的,本实施例可以基于控制参数向量和多个储层性质,先行构建目标油藏的目标油藏的净现值表达式,之后再构建目标油藏的净现值期望表达式。

[0066] 需要说明的是,净现值期望表达式可以是本实施例应用集合优化方式,考虑油藏模型的不确定性,对净现值表达式中的控制参数变量进行优化得到。本实施例可以假设存在 $N_e$ 个不同的储层性质 $y_j$ ,将最大化净现值期望作为目标,以考虑储层模型的不确定性。

[0067] 可选的,净现值期望表达式为:

$$[0068] \quad g_Y(x) \approx \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_t} \frac{v_o Q_{oi}(x, y_j) - v_w Q_{wi}(x, y_j)}{(1+r_t)^{\frac{t_i}{\tau}}}。$$

[0069] 其中, $g_Y(x)$ 为净现值期望, $N_e$ 为储层性质的总数,j为储层性质的编号, $N_t$ 为时间步总数,i为时间步索引, $t_i$ 为自生产开始以来的累计时间, $v_o$ 和 $v_w$ 分别是原油价格和水处理成本, $Q_{oi}$ 和 $Q_{wi}$ 是时间步 $t_i$ 内的总石油和水产量,y为储层性质变量, $y_j$ 为编号为j的储层性质,x为控制参数变量。

[0070] 具体的,本实施例可以先行创建净现值表达式:

$$[0071] \quad g(x, y) = \sum_{i=1}^{N_t} \frac{v_o Q_{oi}(x, y) - v_w Q_{wi}(x, y)}{(1+r_t)^{\frac{t_i}{\tau}}}。$$

[0072] 其中, $g(x, y)$ 为净现值表达式。

[0073] 需要说明的是,  $g_Y(x)$  中的下标Y表示地质模型概率密度函数的期望值。由于在生产优化期间不改变期望的求取方式, 因此  $g_Y(x)$  可以仅被视为控制参数变量X的函数。

[0074] S103、以最大化净现值期望为目标, 对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代, 并计算每一代元素取值对应的净现值期望, 直至满足迭代停止条件为止。

[0075] 具体的, 本实施例可以将最大化净现值期望作为目标, 对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代, 并可以在确定控制参数向量的每一代元素取值后, 根据控制参数向量的元素取值和净现值期望表达式计算相应的净现值期望。

[0076] 其中, 迭代停止条件可以为迭代次数达到预设次数, 也可以为净现值期望达到预设阈值。

[0077] S104、确定迭代过程中的最大净现值期望。

[0078] 具体的, 本实施例可以在每一代元素取值对应的净现值期望中, 确定出最大值即最大净现值期望。

[0079] S105、将最大净现值期望对应的元素取值确定为最优元素取值。

[0080] 具体的, 本实施例可以在确定出最大净现值期望后, 确定最大净现值期望对应的元素取值, 并作为控制参数向量的最优元素取值。

[0081] 本实施例提出的油藏注采优化方法, 可以生成目标油藏的控制参数向量; 其中, 控制参数向量中包括目标油藏的多个油气井中每个油气井的控制参数调整数据。基于控制参数向量构建目标油藏的净现值期望表达式; 其中, 净现值期望表达式中包括控制参数向量。以最大化净现值期望为目标, 对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代, 并计算每一代元素取值对应的净现值期望, 直至满足迭代停止条件为止。确定迭代过程中的最大净现值期望, 并将最大净现值期望对应的元素取值确定为最优元素取值。本实施例可以最大化净现值期望为目标进行油藏注采优化, 确定控制参数向量的最优元素取值, 丰富油藏注采优化手段。

[0082] 相关技术中, 油藏注采优化是油藏生产优化研究领域的重要方向, 发展至今, 相关技术中的油藏注采优化方法主要包括伴随梯度方法、无梯度方法以及混合梯度方法。其中, 伴随梯度类算法求解的是真实梯度, 计算效率最高, 但其需要对油藏数值模拟器中的雅克比矩阵求导, 过程非常复杂, 不能满足实际大规模复杂油田优化的需要。无梯度方法由于不需要复杂的梯度信息并且具有良好的全局性, 但是, 在优化过程中需要大量数值模拟迭代计算才能收敛至最优解, 耗时过长, 与实际应用中优化问题的不适定型及集合大小的限制, 对协方差估计不准易造成伪相关性, 进而影响收敛性及计算精度, 亟需针对这一问题做出相关改进。

[0083] 基于图1, 本实施例提出第二种油藏注采优化方法, 在该方法中, 步骤S103可以包括:

[0084] 确定净现值期望对控制参数向量的敏感性近似值表达式;

[0085] 根据目标油藏的多个储层性质和控制参数向量生成误差控制表达式, 误差控制表达式用于减少敏感性近似值表达式的误差;

[0086] 基于最快下降法和敏感性近似值表达式、误差控制表达式, 对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代, 并计算每一代元素取值对应的净现值期望, 直至满足迭代停止条件为止。

- [0087] 可选的,上述确定净现值期望对控制参数向量的敏感性近似值表达式,可以包括:
- [0088] 使用时间相关的高斯随机变量对控制参数向量中的每个控制参数调整数据进行扰动,以生成多个实现参数,每个实现参数中包括控制参数向量中每个控制参数调整数据对应的扰动后数据;
- [0089] 对于任一实现参数,确定与实现参数对应的地质模型,根据实现参数和地质模型计算相应的净现值,并将实现参数和相应的净现值整体作为一个待处理元素;
- [0090] 对所有待处理元素进行排列,生成相应的实现集;
- [0091] 基于实现集确定净现值期望与控制参数向量间的互协方差近似值表达式,并作为敏感性近似值表达式。
- [0092] 可选的,上述根据目标油藏的多个储层性质和控制参数向量生成误差控制表达式,可以包括:
- [0093] 根据多个储层性质和控制参数向量进行油藏数值模拟,以生成相应的伴随梯度矩阵;
- [0094] 对伴随梯度矩阵进行奇异值分解,得到相应的奇异向量;
- [0095] 基于奇异向量生成用于消除协方差伪相关性影响的局地化矩阵,并将局地化矩阵作为误差控制表达式。
- [0096] 可选的,上述基于最快下降法和敏感性近似值表达式、误差控制表达式,对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止,可以包括:
- [0097] 将控制参数向量中的控制参数调整数据确定为控制参数向量的初代元素取值,根据初代元素取值和净现值期望表达式计算相应的净现值期望;
- [0098] 基于最快下降法、敏感性近似值表达式、误差控制表达式和初始取值确定下一代元素取值,并计算相应的净现值期望;
- [0099] 基于最快下降法、敏感性近似值表达式、误差控制表达式和下一代元素取值,确定新一代元素取值,直至满足迭代停止条件为止。
- [0100] 具体的,本实施例可以使用最快下降法来寻找最大化目标函数 $g_Y(x)$ 的控制变量 $X$ 的元素取值,最快下降法的公式为:
- [0101] 
$$X_{\ell+1} = \frac{1}{\alpha_{\ell}} C_x G_{\ell}^T + X_{\ell}。$$
- [0102] 其中, $\ell$ 表示迭代索引, $\alpha$ 是调整参数决定最快下降法的步长, $G$ 是 $g_Y(x)$ 对控制参数变量的敏感性矩阵,维度为 $1 \times N_x$ 。
- [0103] 具体的,在没有正则化的情况下集合优化问题是不适定的,本实施例可以在敏感性矩阵 $G$ 之前使用协方差矩阵 $C_x$ 为最速上升方式提供预处理以惩罚控制设置频繁的突然变化。在这种情况下,本实施例可以选择高斯协方差函数来描述同一口井不同控制间的时间相关性以限制井控变化的频率和幅度。此外,根据设施的能力,不同的控制参数总是有上限和下限(例如,最小和最大井底压力以及最小和最大产液量和注水量)。本实施例中超出界限的值被截断,并且通过根据截断的值按比例在井之间重新分配注采量并遵守总的注采量限制。
- [0104] 为了计算 $g_Y(x)$ 对控制参数变量 $X$ 的敏感性矩阵 $G$ 的近似值,本实施例可以建立实

现集Z,如:

$$[0105] \quad Z = [z_1, z_2, \dots, z_{N_e}] = \begin{bmatrix} X_{\ell,1} & \dots & X_{\ell,N_e} \\ g_Y(X_{\ell,1}, P_1) & \dots & g_Y(X_{\ell,N_e}, P_{1,N_e}) \end{bmatrix}。$$

[0106] 其中,集合Z包含 $N_e$ 个实现 $z_k$ ,其中 $k=1,2,\dots,N_e$ 。 $X_{1,k}$ 是控制参数变量对应的实现参数,包含每个控制步骤的所有井约束,可以通过使用时间相关的高斯随机变量扰动当前迭代的控制参数变量X中的控制参数调整数据来生成,其中,高斯扰动的方差来自于对于井控变化的频率和幅度的愿望。 $P_k$ 是EnRML中传播的地质模型。 $g_Y(X_{1,1}, P_1)$ 、 $g_Y(X_{1,2}, P_2)$ 和 $g_Y(X_{\ell,N_e}, P_{N_e})$ 将控制参数变量的集合与地质模型的集合结合起来,将控制参数变量的一种实现 $X_{1,k}$ 应用于一种地质模型 $P_k$ 。然后可以根据数值模拟结果计算 $g_Y(X_{1,k}, P_k)$ ,集合Z的构建涉及 $N_e$ 次模拟运行。可以理解的是,本实施例可以通过集合优化方式能够考虑储层地质性质的不确定性。

[0107] 本实施例可以用 $C_{x,g(x)}$ 表示控制参数变量X和 $g_Y(x)$ 之间的互协方差,并使用以下方式从集合Z中计算它的近似值。

$$[0108] \quad C_{x,g(x)} \approx \frac{1}{N_e-1} \sum_{j=1}^{N_e} (X_{\ell,k} - \langle X_{\ell} \rangle)(g_Y(X_{\ell,k}, P_k) - \langle g_Y(X_{\ell}, P) \rangle);$$

[0109] 其中:

$$[0110] \quad \langle X_{\ell} \rangle = \frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} X_{\ell,k};$$

$$\langle g_Y(X_{\ell}, P) \rangle = \frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} g_Y(X_{\ell,k}, P_k);$$

[0111] 此时,最快下降法的公式可以为:

$$[0112] \quad X_{\ell+1} = \frac{1}{\alpha_{\ell}} C_{x,g(x)} + X_{\ell};$$

[0113] 其中,假设在每一次迭代中, $g_Y(x)$ 与控制参数变量X间的关系可以近似为线性关系,如:

$$[0114] \quad C_{x,g(x)} \approx C_x G_{\ell}^T。$$

[0115] 由于互协方差 $C_{x,g(x)}$ 是使用蒙特卡罗方式即集合Z的相关方式估计的,因此当集合Z的规模较小时,会受到伪相关性的影响, $C_{x,g(x)}$ 估计可能不准确。本实施例可以建立奇异值分解局地化方式来过滤除超出临界距离的互协方差,以提高计算精度。

[0116] 本实施例在使用奇异值分解局地化方式中,局地化矩阵中的元素可以表示每一个控制参数变量X和数值模拟观测值 $g_Y(x)$ (总石油和水产量)之间的相关性。

[0117] 其中, $Q_{o_i}(x, y_j)$ 和 $Q_{w_i}(x, y_j)$ 是由基于控制参数向量X与储层性质y的油藏数值模拟计算获得,数值模拟计算中获得的梯度矩阵 $G_Q$ 是控制参数变量X与观测值 $Q_{o_i}(x, y_j)$ 和 $Q_{w_i}(x, y_j)$ 间的梯度矩阵,梯度矩阵 $C_Q$ 的伴随梯度矩阵 $G_{Q_0}$ 定义见公式(1),式中, $Q_{o_i}(x, y_j)$

和 $Q_{w_i}(x, y_j)$ 统一记为 $Q(x, y)$ 。

[0118]  $(G_{QD}Q(x, y), x)_x = (Q(x, y), G_Q x)_x$  -----公式 (1) ;

[0119] 正对集合Z中每一组 $X_{1,k}, P_k$ 计算梯度矩阵 $G_{QD,k}$ ,通过对伴随梯度矩阵 $G_{QD,k}$ 进行奇异值分解,如公式(2):

[0120]  $G_{QD,k} = C_{g(x)}^{-\frac{1}{2}} G C_x^{\frac{1}{2}} = U_k \Sigma_k V_k^T$  -----公式 (2) ;

[0121] 其中, $g(x)$ 为 $g_y(x)$ 的简写。本实施例可以针对控制变量所在的井,将所有 $N_e$ 个右侧奇异向量 $V_k$ 的算术平均值 $\bar{V}_k$ 中对应的列映射到油藏数值模拟模型的网格块中,将这些奇异向量的值设置适当的截断后获得的面积定义为图2中的白色部分小方块的总面积。图2中P1、P2、P3和P4分别表示一个油井,I1表示一个注水井。针对控制参数变量所在的每一口井,计算最小二乘公式的最小值以确定主要方向及次要方向的相关长度 $L_x$ 和 $L_y$ ,该公式为:

[0122]  $F(L_x, L_y) = \sum [s - e(\frac{\delta}{L})]^2$ 。

[0123] 若观测值 $Q_{o_i}(x, y_j)$ 和 $Q_{w_i}(x, y_j)$ 所在位置在上述相关面积之内,则s为1,反之为0。 $\frac{\delta}{L}$ 为控制参数变量所在的井与观测值所在位置之间的欧氏距离,计算公式如公式(3)和公式(4)所示。

[0124]  $\frac{\delta}{L} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{x'}}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{y'}}{L_y}\right)^2}$  -----公式 (3)

$\begin{bmatrix} \delta_{x'} \\ \delta_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix}$  -----公式 (4)

[0125] 式中, $\theta$ 为地质建模主方向, $\theta, L_x$ 和 $L_y$ 的关系可如图3所示。 $\delta_x, \delta_y$ 为在以控制参数变量所在的井位置为原点的正北正南坐标系中测值所在位置的坐标。 $\delta_{x'}$ 和 $\delta_{y'}$ 为计算过程中的两个中间变量。

[0126] 获得 $L_x, L_y$ 后,本实施例可以构建一个大小为 $N_x \times N_x$ 的局地化矩阵 $\rho_{x,g(x)}$ ,对于矩阵中每个元素,若横排坐标对应的控制参数变量所在井与竖排坐标对应的控制参数变量所在井是同一口井则元素值为1,若为不同的井,则若两井间的距离小于相关距离,则局地化矩阵中对应元素为1,反之则为0。在集合优化方式中,本实施例引入该局地化矩阵以消除协方差伪相关性的影响,则:

[0127]  $X_{\ell+1} = \frac{1}{\alpha_\ell} \rho_{x,g(x)} C_{x,g(x)} + X_\ell$ 。

[0128] 本实施例对如图4所示的egg模型中8注4采共12口井进行注采优化,相比不进行局地化的方法,本实施例局地化方法运行速度提升18%,迭代次数减少26%。本实施例建立了一套完整的基于奇异值分解局地化的油藏注采集合优化方式,可以在油田注采自动优化的过程中,实现最大程度降低计算开销,同时避免陷入局部最优,有效指导后期开发调整,有较好的应用前景。

[0129] 本实施例可以充分考虑了集合优化过程中小样本集合对协方差估计不准而造成的伪相关性,引入了奇异值分解局地化方式,极大改善了协方差估计的准确性,提升了注采

优化算法的计算效率。

[0130] 本实施例提出的油藏注采优化方法,可以形成了一种有效的局地化矩阵计算方式,通过奇异值分解合理求得局地化矩阵的相关长度,极大提高对集合优化方式中协方差矩阵的估算精度。并可以形成对全部计算过程的自动化算法,通过编程实现对油田注采的自动优化调节。

[0131] 如图5所示,本实施例提出一种油藏注采优化装置,该装置可以包括:

[0132] 生成单元101,用于生成目标油藏的控制参数向量,控制参数向量中包括目标油藏的多个油气井中每个油气井的控制参数调整数据;

[0133] 构建单元102,用于基于控制参数向量构建目标油藏的净现值期望表达式;其中,净现值期望表达式中包括控制参数向量;

[0134] 迭代单元103,用于以最大化净现值期望为目标,对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止;

[0135] 第一确定单元104,用于确定迭代过程中的最大净现值期望;

[0136] 第二确定单元105,用于将最大净现值期望对应的元素取值确定为最优元素取值。

[0137] 需要说明的是,生成单元101、构建单元102、迭代单元103、第一确定单元104和第二确定单元105的处理过程及其带来的有益效果,可以分别参照图1中的步骤S101至S105,不再赘述。

[0138] 可选的,构建单元102,还用于:

[0139] 基于控制参数向量和目标油藏的储层性质变量,构建目标油藏的净现值表达式;

[0140] 根据目标油藏的多个储层性质和净现值表达式,构建净现值期望表达式。

[0141] 可选的,净现值期望表达式为:

$$[0142] \quad g_Y(x) \approx \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_t} \frac{v_o Q_{o_i}(x, y_j) - v_w Q_{w_i}(x, y_j)}{(1+r_\tau)^{t_i}};$$

[0143] 其中, $g_Y(x)$ 为净现值期望, $N_e$ 为储层性质的总数, $j$ 为储层性质的编号, $N_t$ 为时间步总数, $i$ 为时间步索引, $t_i$ 为自生产开始以来的累计时间, $v_o$ 和 $v_w$ 分别是原油价格和水处理成本, $Q_{o_i}$ 和 $Q_{w_i}$ 是时间步 $t_i$ 内的总石油和水产量, $y$ 为储层性质变量, $y_j$ 为编号为 $j$ 的储层性质, $x$ 为控制参数变量。

[0144] 可选的,迭代单元103,还用于:

[0145] 确定净现值期望对控制参数向量的敏感性近似值表达式;

[0146] 根据目标油藏的多个储层性质和控制参数向量生成误差控制表达式,误差控制表达式用于减少敏感性近似值表达式的误差;

[0147] 基于最快下降法和敏感性近似值表达式、误差控制表达式,对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止。

[0148] 可选的,迭代单元103,还用于:

[0149] 使用时间相关的高斯随机变量对控制参数向量中的每个控制参数调整数据进行扰动,以生成多个实现参数,每个实现参数中包括控制参数向量中每个控制参数调整数据对应的扰动后数据;

[0150] 对于任一实现参数,确定与实现参数对应的地质模型,根据实现参数和地质模型计算相应的净现值,并将实现参数和相应的净现值整体作为一个待处理元素;

[0151] 对所有待处理元素进行排列,生成相应的实现集;

[0152] 基于实现集确定净现值期望与控制参数向量间的互协方差近似值表达式,并作为敏感性近似值表达式。

[0153] 可选的,迭代单元103,还用于:

[0154] 根据多个储层性质和控制参数向量进行油藏数值模拟,以生成相应的伴随梯度矩阵;

[0155] 对伴随梯度矩阵进行奇异值分解,得到相应的奇异向量;

[0156] 基于奇异向量生成用于消除协方差伪相关性影响的局地化矩阵,并将局地化矩阵作为误差控制表达式。

[0157] 可选的,迭代单元103,还用于:

[0158] 将控制参数向量中的控制参数调整数据确定为控制参数向量的初代元素取值,根据初代元素取值和净现值期望表达式计算相应的净现值期望;

[0159] 基于最快下降法、敏感性近似值表达式、误差控制表达式和初始取值确定下一代元素取值,并计算相应的净现值期望;

[0160] 基于最快下降法、敏感性近似值表达式、误差控制表达式和下一代元素取值,确定新一代元素取值,直至满足迭代停止条件为止。

[0161] 本实施例提出的油藏注采优化装置,可以确定目标油藏的多个储层性质,以及生成控制参数向量;其中,控制参数向量中包括目标油藏的多个油气井中每个油气井的控制参数调整数据。基于控制参数向量和多个储层性质,构建目标油藏的净现值期望表达式;其中,净现值期望表达式中包括控制参数向量。以最大化净现值期望为目标,对净现值期望表达式中控制参数向量的元素取值进行迭代,并计算每一代元素取值对应的净现值期望,直至满足迭代停止条件为止。确定迭代过程中的最大净现值期望,并将最大净现值期望对应的元素取值确定为最优元素取值。本实施例可以最大化净现值期望为目标进行油藏注采优化,确定控制参数向量的最优元素取值,丰富油藏注采优化手段。

[0162] 本实施例中的油藏注采优化装置是以功能单元的形式来呈现,这里的单元是指ASIC(Application Specific Integrated Circuit,专用集成电路)电路,执行一个或多个软件或固定程序的处理器和存储器,和/或其他可以提供上述功能的器件。

[0163] 本发明实施例还提供一种计算机设备,具有上述图5所示的油藏注采优化装置。

[0164] 请参阅图6,本发明可选实施例提供的一种计算机设备的结构示意图,该计算机设备包括:一个或多个处理器10、存储器20,以及用于连接各部件的接口,包括高速接口和低速接口。各个部件利用不同的总线互相通信连接,并且可以被安装在公共主板上或者根据需要以其它方式安装。处理器可以对在计算机设备内执行的指令进行处理,包括存储在存储器中或者存储器上以在外部输入/输出装置(诸如,耦合至接口的显示设备)上显示GUI的图形信息的指令。在一些可选的实施方式中,若需要,可以将多个处理器和/或多条总线与多个存储器和多个存储器一起使用。同样,可以连接多个计算机设备,各个设备提供部分必要的操作(例如,作为服务器阵列、一组刀片式服务器、或者多处理器系统)。图6中以一个处理器10为例。

[0165] 处理器10可以是中央处理器,网络处理器或其组合。其中,处理器10还可以进一步包括硬件芯片。上述硬件芯片可以是专用集成电路,可编程逻辑器件或其组合。上述可编程逻辑器件可以是复杂可编程逻辑器件,现场可编程逻辑门阵列,通用阵列逻辑或其任意组合。

[0166] 其中,存储器20存储有可由至少一个处理器10执行的指令,以使至少一个处理器10执行实现上述实施例示出的方法。

[0167] 存储器20可以包括存储程序区和存储数据区,其中,存储程序区可存储操作系统、至少一个功能所需要的应用程序。存储数据区可存储根据计算机设备的使用所创建的数据等。此外,存储器20可以包括高速随机存取存储器,还可以包括非瞬时存储器,例如至少一个磁盘存储器件、闪存器件、或其他非瞬时固态存储器件。在一些可选的实施方式中,存储器20可选包括相对于处理器10远程设置的存储器,这些远程存储器可以通过网络连接至该计算机设备。上述网络的实例包括但不限于互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。

[0168] 存储器20可以包括易失性存储器,例如,随机存取存储器。存储器也可以包括非易失性存储器,例如,快闪存储器,硬盘或固态硬盘。存储器20还可以包括上述种类的存储器的组合。

[0169] 该计算机设备还包括通信接口30,用于该计算机设备与其他设备或通信网络通信。

[0170] 本发明实施例还提供了一种计算机可读存储介质,上述根据本发明实施例的方法可在硬件、固件中实现,或者被实现为可记录在存储介质,或者被实现通过网络下载的原始存储在远程存储介质或非暂时机器可读存储介质中并将被存储在本地存储介质中的计算机代码,从而在此描述的方法可被存储在使用通用计算机、专用处理器或者可编程或专用硬件的存储介质上的这样的软件处理。其中,存储介质可为磁碟、光盘、只读存储记忆体、随机存储记忆体、快闪存储器、硬盘或固态硬盘等;进一步地,存储介质还可以包括上述种类的存储器的组合。可以理解,计算机、处理器、微处理器控制器或可编程硬件包括可存储或接收软件或计算机代码的存储组件,当软件或计算机代码被计算机、处理器或硬件访问且执行时,实现上述实施例示出的方法。

[0171] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

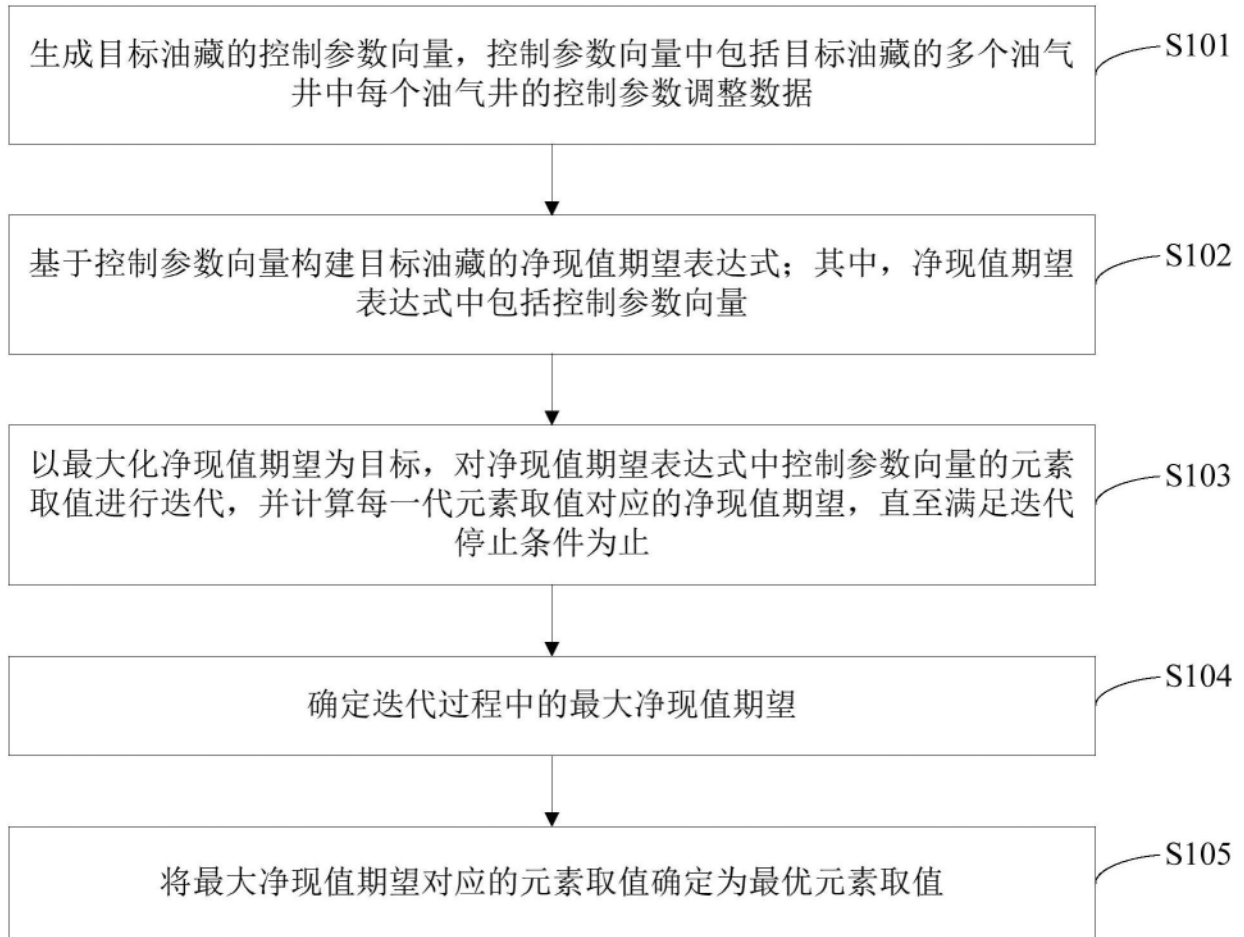


图1

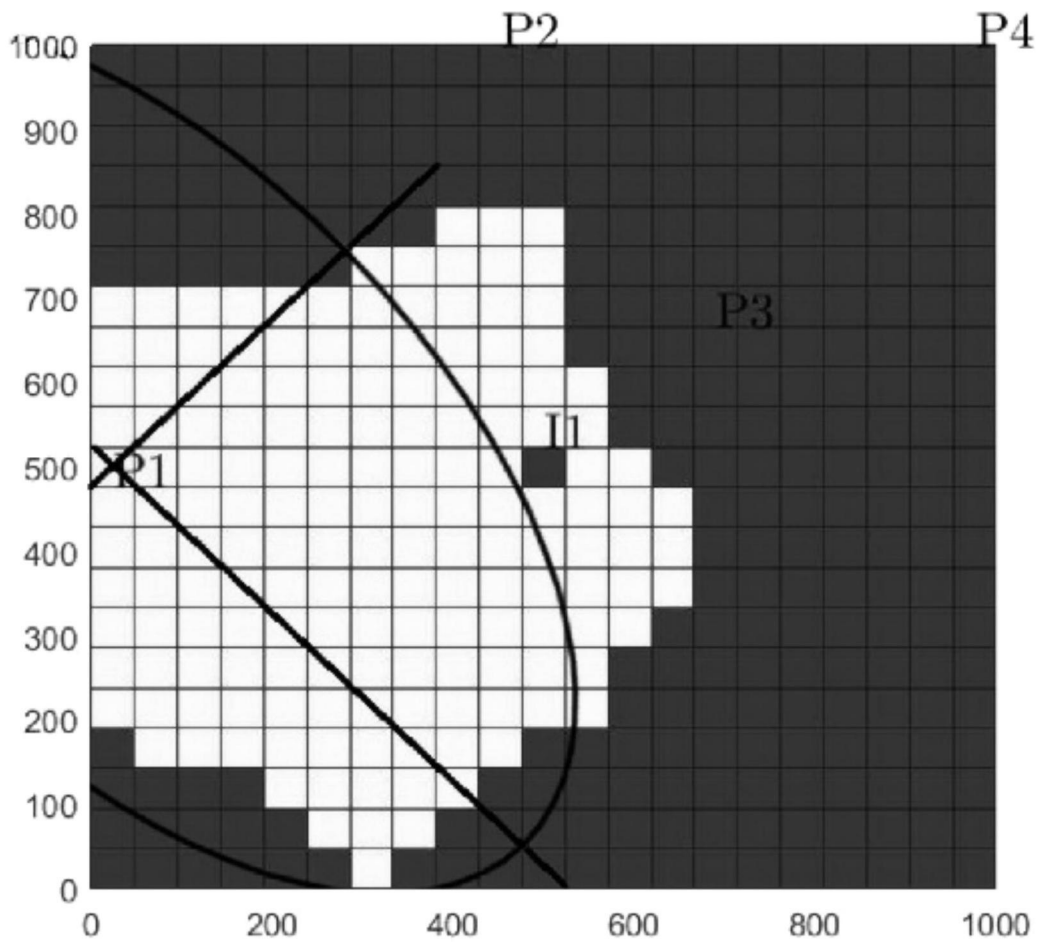


图2

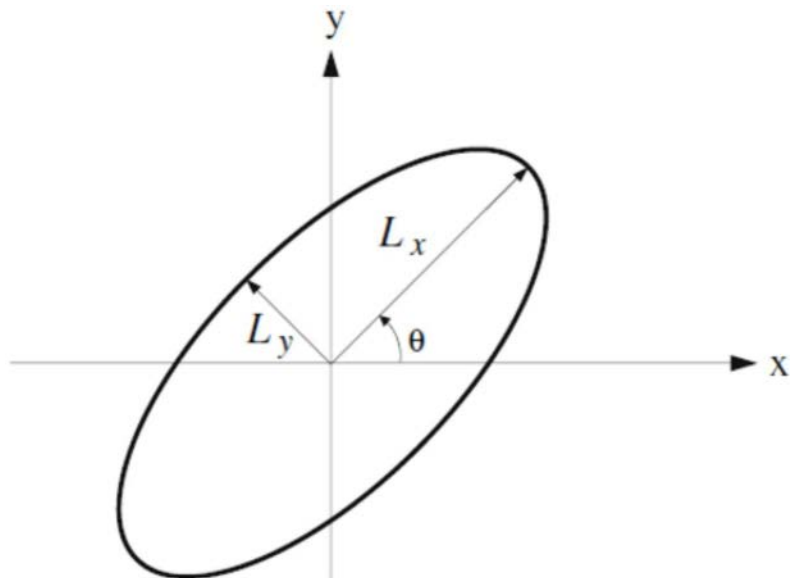


图3

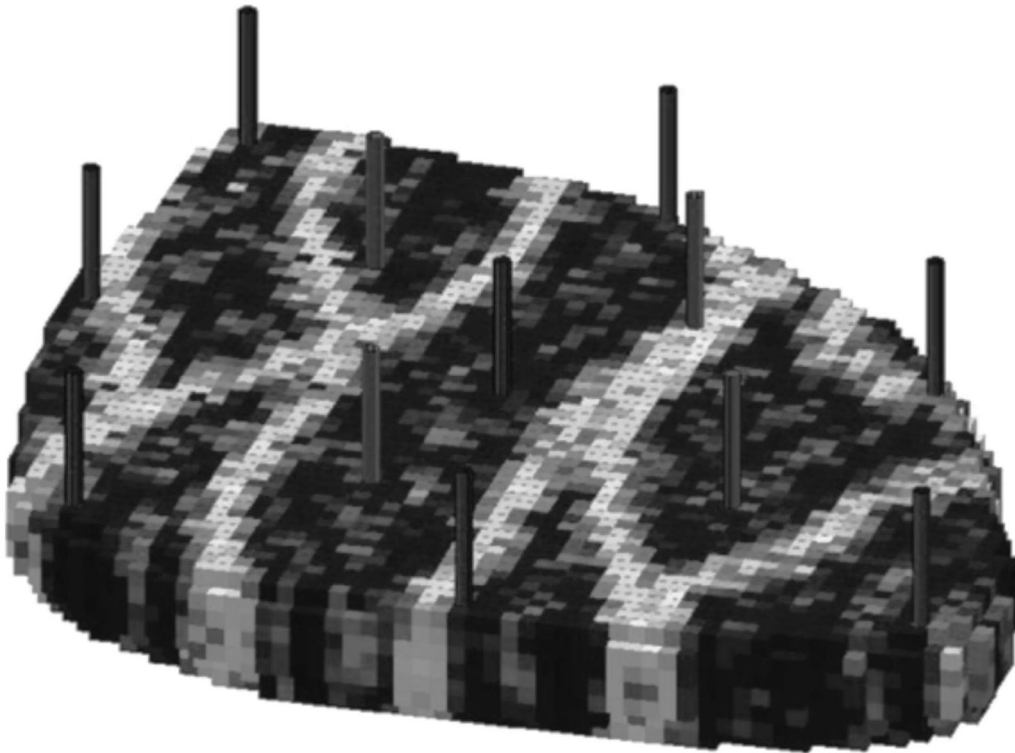


图4

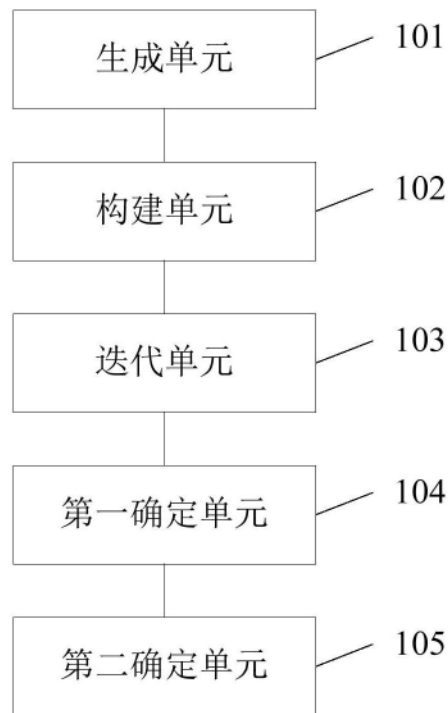


图5

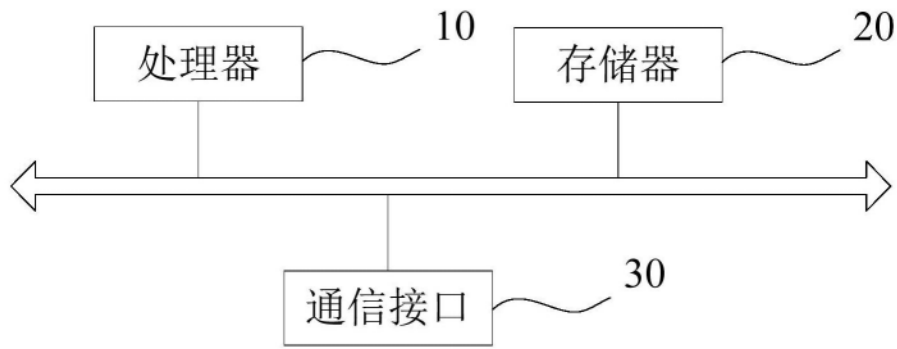


图6