



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102007459 B

(45) 授权公告日 2015. 01. 07

(21) 申请号 200980113561. X

(22) 申请日 2009. 03. 09

(30) 优先权数据

61/124, 500 2008. 04. 17 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2010. 10. 18

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2009/036540 2009. 03. 09

(87) PCT国际申请的公布数据

W02009/145960 EN 2009. 12. 03

(73) 专利权人 埃克森美孚上游研究公司

地址 美国德克萨斯州

(72) 发明人 K·C·弗曼 V·戈尔

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司

公司 11245

代理人 赵蓉民

(51) Int. Cl.

G06E 1/00 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101221634 A, 2008. 07. 16, 说明书第 34 页 16-17 行、57 页第 8-9 行, 35 页 8-10 行, 40 页 20-21 行, 43 页第 4 行, 附图 7.

US 2004205038 A1, 2004. 10. 14, 全文.

US 7254091 B1, 2007. 08. 07, 全文.

EP 1630348 A1, 2006. 03. 01, 全文.

审查员 丁文勃

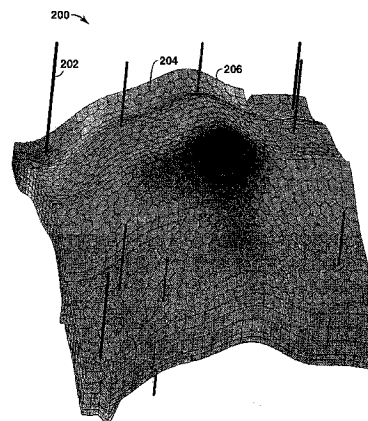
权利要求书3页 说明书10页 附图5页

(54) 发明名称

用于储层开发计划的鲁棒性基于优化的决策支持工具

(57) 摘要

储层开发计划的鲁棒性基于优化的决策支持工具可包括输入数据源、优化模型、模拟储层的高保真度模型和与优化模型接口的一个或更多求解例程。优化模型可考虑在优化模型内直接具有不确定性的未知参数。该模型可系统地处理不确定数据,例如全面地或甚至考虑所有不确定数据。因此,优化模型可提供灵活的或鲁棒性的优化解决方案,所述优化解决方案在不确定性空间上保持可行。一旦储层模型被优化,则可生成最终开发计划。



1. 一种生产碳氢化合物的方法,其包括以下步骤:

利用计算机接收关于储层开发的储层和 / 或地面设施数据;

利用所述计算机,响应于经由计算机实现的鲁棒性优化处理所接收的储层和 / 或地面设施数据,生成储层开发计划,所述鲁棒性优化基于储层和 / 或地面设施动态的近似,其中所述生成步骤包括根据与所接收的储层和 / 或地面设施数据关联的不确定性空间,生成所述储层开发计划;以及

根据所述储层开发计划,从储层生产碳氢化合物。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其中计算机实现的鲁棒性优化包括根据所接收的储层和 / 或地面设施数据和不确定性空间,优化所述储层开发计划的至少某方面。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其中接收储层和 / 或地面设施数据的步骤包括接收已知储层和 / 或地面设施数据参数和不确定的储层和 / 或地面设施数据参数,以及

其中经由计算机实现的鲁棒性优化处理所接收的储层和 / 或地面设施数据包括用鲁棒性优化模型处理所述储层和 / 或地面设施数据,该模型并入了所述不确定的储层和 / 或地面设施数据参数。

4. 根据权利要求 1 所述的方法,其中不确定性空间与所接收的储层和 / 或地面设施数据关联,且

其中经由计算机实现的鲁棒性优化处理所接收的储层和 / 或地面设施数据包括整体考虑不确定性空间。

5. 一种用于生产碳氢化合物的方法,其包括以下步骤:

利用计算机接收关于储层开发计划的储层和 / 或地面设施数据,其中不确定性与所述储层和 / 或地面设施数据关联;

利用所述计算机响应于用并入了所述不确定性的基于计算机的优化模型处理所接收的储层和 / 或地面设施数据而产生储层开发计划的至少某个部分,其中不确定性参数描述所述不确定性,且其中所述基于计算机的优化模型包括鲁棒性优化模型,该模型基于储层和 / 或地面设施动态的近似,并入了所述不确定性参数;以及

根据所述储层开发计划的至少某个部分,从储层生产碳氢化合物。

6. 根据权利要求 5 所述的方法,其中在基于计算机的优化模型中并入所述不确定性包括捕获所述不确定性的多个实现间的权衡。

7. 根据权利要求 5 所述的方法,其中响应于用并入了不确定性的基于计算机的优化模型处理所接收的储层和 / 或地面设施数据而产生储层开发计划的至少某个部分的所述步骤包括:

在整个不确定性空间上强迫优化问题的可行性。

8. 根据权利要求 5 所述的方法,其中响应于用并入了不确定性的基于计算机的优化模型处理所接收的储层和 / 或地面设施数据而产生储层开发计划的至少某个部分的所述步骤包括:

在所述优化模型内系统处理不确定的数据。

9. 一种生产石油的方法,其包括以下步骤:

利用计算机接收关于开发石油储层的决策的多个储层和 / 或地面设施数据元素,其中不确定性的相应特征与每个所述储层和 / 或地面设施数据元素关联;

响应于用基于计算机的优化例程处理每个所述储层和 / 或地面设施数据元素和不确定性的每个所述相应特征,输出针对所述决策的建议,其中所述基于计算机的优化例程包括鲁棒性优化模型,该模型基于储层和 / 或地面设施动态的近似 ;以及

根据输出的建议,从所述石油储层生产石油。

10. 根据权利要求 9 的方法,其中所述鲁棒性优化模型并入了不确定性的每个所述相应特征。

11. 根据权利要求 9 的方法,其中用所述基于计算机的优化例程处理每个所述储层和 / 或地面设施数据元素和不确定性的每个所述相应特征包括覆盖不确定性空间。

12. 一种从储层生产碳氢化合物的方法,其包括 :

利用计算机获得包括不确定性的储层和 / 或地面设施输入数据 ;

使用所述计算机,利用所述输入数据,用储层或地面设施动态的高保真度模型生成所述储层的第一模拟,其中所述第一模拟生成第一高保真度输出数据 ;

利用所述储层和 / 或地面设施输入数据和所述第一高保真度输出数据,用所述计算机生成储层或地面设施动态的低保真度模型,其中所述低保真度模型生成预测 ;

利用所述储层和 / 或地面设施输入数据和储层或地面设施动态的所述低保真度模型优化储层开发计划模型,其中所述储层开发计划模型生成储层开发计划输出数据 ;

利用所述储层和 / 或地面设施输入数据和所述储层开发计划输出数据,使用储层或地面设施动态的所述高保真度模型,用所述计算机执行所述储层的第二模拟,其中所述第二模拟生成第二高保真度输出数据 ;

利用所述计算机比较所述第二高保真度输出数据和所述低保真度模型的所述预测 ;

重复以下步骤直到所述第二高保真度输出数据与所述低保真度模型的所述预测一致 :生成储层或地面设施动态的低保真度模型,优化储层开发计划模型,使用储层或地面设施动态的所述高保真度模型执行所述储层的第二模拟,以及比较所述第二高保真度输出数据和所述低保真度模型的所述预测,其中所述优化储层开发计划模型是用鲁棒性优化模型执行的 ;以及

根据所优化的储层开发计划模型的输出,从所述储层生产碳氢化合物。

13. 根据权利要求 12 所述的方法,进一步包括 :

响应于所述第二高保真度输出数据与所述低保真度模型的所述预测一致而生成开发计划。

14. 根据权利要求 12 所述的方法,其中求解例程与所述鲁棒性优化模型接口,其辅助所述鲁棒性优化模型来优化所述储层的开发计划。

15. 根据权利要求 12 所述的方法,其中所述鲁棒性优化模型包括求解例程,其用于辅助优化所述储层的开发计划。

16. 一种从地下储层生产碳氢化合物的方法,其包括 :

基于储层和 / 或地面设施输入数据,利用计算机生成储层开发计划系统 ;

根据不确定性空间,利用所述计算机优化所述储层开发计划系统 ;以及

根据来自所优化的储层开发计划系统的输出,从所述储层生产碳氢化合物,其中根据所述不确定性空间优化所述储层开发计划系统包括 :

执行基于计算机的鲁棒性优化模型,该优化模型基于储层和 / 或地面设施动态的近

似,并入了所述输入数据的不确定性。

17. 根据权利要求 16 所述的方法,其中所述输入数据包括确定性分量和非确定性分量,以及

其中根据所述不确定性空间优化所述储层开发计划系统的步骤包括:

以鲁棒性优化模型考虑每个所述非确定性分量。

18. 根据权利要求 16 所述的方法,其中所述不确定性空间规定所述储层和 / 或地面设施输入数据的固有不确定性。

19. 根据权利要求 16 所述的方法,其中所述储层开发计划系统包括:

包括低保真度储层模型的鲁棒性优化模型;以及

高保真度储层模型,

其中所述高保真度模型从所述鲁棒性优化模型接受一个或更多参数输入数据,并提供一个或更多储层或地面设施特性输入数据到所述鲁棒性优化模型。

用于储层开发计划的鲁棒性基于优化的决策支持工具

[0001] 相关申请的交叉参考

[0002] 本申请要求 2008 年 4 月 17 号申请的美国临时专利申请 61/124500 和 2008 年 7 月 7 日申请的欧洲专利申请 No. 08159867.4 的权益,其标题为“ROBUST OPTIMIZATION-BASED DECISION SUPPORT TOOL FOR RESERVOIR DEVELOPMENT PLANNING”,其全部内容通过引用合并于此。

[0003] 本申请涉及以下的申请:2008 年 4 月 18 日申请的美国临时专利申请 61/124681 和 2009 年 1 月 30 申请的 PCT 申请 No. PCT/US09/32736,其标题为“MARKOV DECISION PROCESS-BASED DECISION SUPPORT TOOL FOR RESERVOIR DEVELOPMENT PLANNING”;以及 2008 年 4 月 21 日申请的美国临时专利申请 61/124929,其标题为“STOCHASTIC PROGRAMMING-BASED DECISION SUPPORT TOOL FOR RESERVOIR DEVELOPMENT PLANNING”。这些申请全部都通过引用合并在此。

技术领域

[0004] 本发明一般涉及油气生产,并具体涉及考虑不确定性的储层开发计划。

背景技术

[0005] 开发和管理石油资源通常需要进行多年的大量经济投资,同时期待收到对应的大量财政回报。石油储层是产生利润还是亏损主要取决于为储层开发和管理实施的策略和战略。储层开发计划涉及策划和 / 或选择将长期产生有利经济结果的强有力的策略和战略。

[0006] 储层开发计划可包括做出涉及例如生产平台的规模、计时 (timing) 和位置以及后来的扩展和连接的决策。关键决策可包括平台数量、位置、分配,以及在每个油田中要钻的井和要完成的井的计时。钻后决策可以包括确定多井之间的产出率分配。任何一个决策或行为可能具有系统范围的牵连,例如其通过石油操作或储层传播积极或消极影响。考虑到仅仅是面对石油资源管理人员的许多决策中有代表性的一小部分的储层开发计划的上述方面,人们可以认识到计划的价值和影响。

[0007] 基于计算机的建模对储层开发计划具有显著潜力,特别是与先进数学技术结合时。基于计算机的计划工具支持做出优良的决策。一类计划工具包括基于处理各种信息输入识别针对一组决策的最优解决方案的方法。例如,示例性优化模型可以朝着找到这样解决方案的方向运转,所述解决方案从具有定义的一组约束的已知可能中产生最佳产出。因此,石油操作可以通过适当应用于优化石油资源开发计划和管理的优化模型实现大的经济利益,特别是那些涉及针对多年的多个油田或气田做出决策的模型。

[0008] 在此使用的术语“最优的”、“进行优化”、“使优化”、“最优性”、“优化”(以及这些术语的派生词和其它形式,以及语言学上相关的单词和短语)并非要在需要本发明来寻找最佳解决方案或做出最佳决策方面进行限制。尽管数学上最优的解决方案(或解)事实上可以获得所有数学上可获得的可能性中的最佳可能性,但优化例程、方法、模型和过程的真实世界实施例可能朝着这样的目标努力而不曾实际地实现完美。因此,本领域技术人员在受

益于本公开的情况下将理解这些术语在本发明范围的背景下是更通用的。这些术语可描述朝着一个解决方案工作,该解决方案可能是最佳的可获得的解决方案、优选解决方案或在约束范围内提供特定益处的解决方案;或持续改善的解决方案;或改进的解决方案;或搜索目标的高点或最大值的解决方案;或处理从而减少罚函数 (penalty function) 的解决方案等等。在某些示例性实施例中,优化模型可以是函数和方程的代数系统,包括 (1) 可限制在特定域范围内的连续或整数变化的决策变量, (2) 基于输入数据 (参数) 和决策变量的约束方程,其限制指定的条件集内变量的活动,该条件集定义正在被解决的优化问题的可行性,和 / 或 (3) 基于输入数据 (参数) 和决策变量的正在被优化的目标函数,要么通过使目标函数最大化或使目标函数最小化来优化目标函数。在某些变化中,优化模型可包括非可微分黑盒和其他非代数函数或方程。

[0009] 典型的 (确定性) 数学优化问题涉及某些目标函数的最小化或最大化,所述目标函数受到关于问题变量的一组约束。这就是通常所知的科学和工程领域的数学规划 (programming)。数学规划的子类别包括线性规划 (LP)、混合整数规划 (MIP)、非线性规划 (NLP) 和混合整数非线性规划 (MINLP)。确定性优化模型通常是以下面的形式提出的,其中目标函数 “f” 是受到约束函数阵列 “g” 而优化的,该约束函数阵列必须通过设定决策变量阵列 “x” 和 “y” 的值而得到满足。在提出数学规划模型时,约束函数通常包括已知数据参数和未知变量值的组合。

[0010] $\min f(x, y)$

[0011] s. t. $g(x, y) \leq 0$

[0012] 解决 (或求解) 数学最优性问题可包括寻找决策变量的值,以便满足所有约束,其中通过改变变量值同时仍然保持关于所有约束可行而改善目标函数的值,在数学上是实质不可能的。当问题的某些 “已知” 固定参数实际上不确定时,确定性优化问题的解决方案可以是亚最优的,或甚至是不可行的,特别是如果问题参数的取值最终不同于被选择用作要求解的优化模型的输入的那些值时。

[0013] 储层开发计划的优化过程是挑战性的,即使假设经济情况和储层和地面设施的动态完全已知。通常,大量软硬约束施加到更大数目的决策变量上。然而,实际上,储层动态、经济情况和 / 或决策过程的其他组成部分 (component) 中存在不确定性,这使得优化过程复杂。

发明内容

[0014] 传统储层开发计划技术通常不能充分考虑这类不确定性。不确定性通常是与开发计划相关的信息和因素中固有的。也就是,优化问题的输入 (和或许问题的数学建模) 含有不确定性。不确定性可视为非确定性的或经过推理 (a priori) 保持未知的特征或方面。在开发和管理石油资源时为决策支持应用计算机编程的常规方法没有充分全面地考虑这些不确定性。

[0015] 当前,储层动态、经济情况或决策过程的其他组成部分中不确定性的考虑通常被减少到非常有限数量的情形,例如,由 “高边 (high-side)” 情形、“最可能 (most likely)” 情形和 “低边 (low-side)” 情形表示的情形。例如,对于每种上述情形,通常通过取样不确定性空间中的随机点,储层动态中的不确定性被减小到已知值。在此使用的术语 “不确定性

空间”，通常指和待解决问题相关的不确定性的表示，例如，输入到优化例程的数据的总体不确定性。

[0016] 基于不确定性空间有限取样，值被分配给“高边”情形，“最可能”情形和“低边”情形。通常针对特定情形优化决策，通常是“最可能”情形，且随后针对剩余的两种情形估计从而提供可接受的风险水平。然而，该方法显著低估不确定性的复杂性并可导致次优的解或不如某个其他未经确认解有利的解。

[0017] 考虑到前面的讨论，显然本领域需要改进的工具，其可辅助储层开发计划和 / 或可提供和储层开发和资源管理有关的决策支持。进一步需要这样的工具，其可为计划或决策支持考虑宽范围的不确定性。进一步还需要系统处理用于产生计划或决策支持的模型中的不确定数据的工具。进一步需要这样的工具，其可处理和产生储层开发计划或决策支持有关的完整不确定性空间。进一步需要这样的工具，其中数据中的固有不确定性直接并入到决策优化模型中，因此与在不确定性的各种实现上的决策相关的权衡被捕获，且因此就在石油和 / 或天然气储层开发计划做出决策时，可获得更好的信息。前面本领域需求的讨论实际上是代表性的，而非详尽的。解决一个或更多这类需求、或本领域某些其他相关缺点的技术会有益于储层开发计划，例如，为更有效地且更有利地开发和管理储层提供决策。

[0018] 本发明支持为开发和管理石油资源，如石油储层做出决策、计划、战略和 / 或策略。

[0019] 在本发明的一个方面中，基于计算机或软件的方法可提供和开发一个或更多石油储层有关的决策支持。例如，该方法可基于与储层和 / 或操作相关的输入数据产生储层开发计划。这样的输入数据可包括未知的或不清楚的流体动力学、储层尺寸、当前开发状态、当前和计划的石油价格、钻井成本、钻探时间的每小时成本、地质数据、资本成本、当前和计划可用资源（人力、财务、设备等等）和规章环境，仅举几个代表性可能性。输入数据可具有不确定性。更具体地，输入数据的每个元素可具有关联的不确定性的水平、量或指示。某些输入数据已知有高度不确定性，如钻探时间的当前成本，而其他输入数据可具有不同程度的不确定性。例如，未来钻探时间成本的不确定性可随着投入未来的时间量增加而增加。也就是，开发计划的第 15 年的钻探时间成本的不确定性可能高于第二年的钻探时间成本的不确定性。输入数据的总不确定性可定义不确定性空间。软件例程可通过处理输入数据和考虑不确定性空间，例如，通过应用鲁棒性优化例程而产生储层开发计划。产生储层开发计划可包括输出计划的某方面，做出和生成或改变计划相关的判定，或就关于例如储层开发或管理的一个或更多决策做出建议。

[0020] 在一个一般方面，储层开发计划方法包括接收关于储层开发的数据。响应于经由计算机实现的鲁棒性优化处理接收的数据而生成储层开发计划。

[0021] 这方面的实施可包括以下特征中的一个或更多。例如，生成步骤可包括根据与接收的数据关联的不确定性空间生成储层开发计划。计算机实现的鲁棒性优化可包括基于接收的数据和不确定性空间优化储层开发计划的至少某个方面。接收数据可包括接收已知数据参数和不确定的数据参数。经由计算机实现的鲁棒性优化处理接收的数据包括用鲁棒性优化模型处理数据，该鲁棒性优化模型并入了不确定的数据参数。不确定性空间可与接收的数据关联。经由计算机实现的鲁棒性优化处理接收的数据可包括整体考虑不确定性空间。

[0022] 在另一个一般方面中,储层开发计划的方法包括接收关于储层开发计划的数据,其中不确定性与数据关联。至少某部分储层开发计划是响应于用基于计算机的优化模型处理接收的数据产生的,该模型包括不确定性。

[0023] 该方面的实施可包括一个或更多以下特征。例如,不确定性参数可说明不确定性,且基于计算机的优化模型可包括鲁棒性优化模型,该鲁棒性优化模型并入了不确定性参数。在基于计算机的优化模型中并入不确定性可包括捕获不确定性的多种实现之间的权衡。响应于用基于计算机的优化模型处理接收的数据而产生至少某部分储层开发计划的步骤可包括在整个不确定性空间上强制优化问题的可行性,该基于计算机的优化模型并入了不确定性。响应于用并入了不确定性的基于计算机的优化模型处理接收的数据而产生至少某部分储层开发计划可包括在优化模型内系统处理不确定的数据。

[0024] 在另一个方面中,关于开发石油资源的决策支持方法包括接收关于决策的多个数据元素,该决策关于开发石油储层,其中不确定性的相应特征与每个数据元素关联。针对决策的建议是响应于用基于计算机的优化例程处理每个数据元素和不确定性的每个相应特征输出的。

[0025] 这方面的实施可包括一个或更多以下特征。例如,基于计算机的优化例程可包括鲁棒性优化模型。鲁棒性优化模型可并入不确定性的每个相应特征。用基于计算机的优化例程处理每个数据元素和不确定性的每个相应特征可包括覆盖不确定性空间。

[0026] 在另一一般方面中,优化储层开发计划的基于计算机的方法包括提供输入数据,该输入数据包括不确定性。储层的第一模拟是用储层或地面设施动态的高保真度模型利用输入数据生成的,其中第一模拟生成第一高保真度输出数据。储层或地面设施动态的低保真度模型是用输入数据和第一高保真度输出数据生成的,其中低保真度模型生成预测。储层开发计划模型是利用输入数据和储层或地面设施动态的低保真度模型优化的,其中储层开发计划模型生成储层开发计划输出数据。储层的第二模拟是用储层或地面设施动态的高保真度模型利用输入数据和储层开发计划输出数据执行的,其中第二模拟生成第二高保真度输出数据。第二高保真度输出数据与低保真度模型的预测比较。这些步骤包括生成储层或表面设施动态的低保真度模型,优化储层开发计划模型,使用储层或地面设施动态的高保真度模型执行储层的第二模拟,并比较第二高保真度输出数据和低保真度模型的预测,重复这些步骤直到第二高保真度输出数据与低保真度模型的预测基本一致。

[0027] 该方面的实施可包括一个或更多以下特征。例如,优化储层开发计划模型可用鲁棒性优化模型执行。开发计划是响应于第二高保真度输出数据与低保真度模型的预测一致而生成的。与鲁棒性优化模型接口的求解例程 (solution routine) 可帮助鲁棒性优化模型优化储层的开发计划。鲁棒性优化模型可包括用于帮助优化储层的开发计划的求解例程。

[0028] 在另一个一般方面,从地下储层生产碳氢化合物的方法包括基于输入数据生成储层开发计划系统。储层开发计划系统是根据不确定性空间优化的。碳氢化合物是根据优化的储层开发计划系统的输出从储层生产的。

[0029] 该方面的实施可包括一个或更多以下特征。例如,输入数据可包括确定性分量和非确定性分量。根据不确定性空间优化储层开发计划系统包括以鲁棒性优化模型考虑每个不确定性分量。根据不确定性空间优化储层开发计划系统可包括执行基于计算机的鲁棒性优化模型,其并入了输入数据的不确定性。不确定性空间可规定输入数据的固有不确定性。

储层开发计划系统可包括优化模型,该优化模型包括低保真度储层模型和高保真度储层模型。高保真度模型从优化模型接受一个或更多参数输入数据,并提供一个或更多储层或地面设施特性输入数据给优化模型。

[0030] 发明内容中给出的针对储层开发的决策支持工具的讨论仅用于说明目的。从审阅所公开实施例的以下详细说明并参考所附附图和权利要求,可更清楚地理解和认识本发明的不同方面。而且,本发明的其他方面、系统、方法、特征、优点和目的对研究以下附图和详细说明的本领域技术人员来说是显而易见的。所有这些方面、系统、方法、特征、优点和目的包括在本说明书内,处于本发明范畴内,并受权利要求保护。

附图说明

[0031] 图 1 是根据本发明某些示例性实施例,表示与储层模型数据关联的整个不确定性空间的使用示图。

[0032] 图 2 是根据本发明某些示例性实施例的三维储层模型示图,该模型包括定义多个节点的网格。

[0033] 图 3 是根据本发明某些示例性实施例,模拟图 2 的储层模型操作的储层模拟器的流程图。

[0034] 图 4 是根据本发明某些示例性实施例,鲁棒性基于优化的储层开发计划系统的示意图。

[0035] 图 5 是根据本发明某些示例性实施例,操作图 4 的鲁棒性基于优化的储层计划系统的方法流程图。

[0036] 本发明的许多方面可参考上面附图更好地理解。图中所示元素和特征不必按比例,相反,强调的重点是明确地示出本发明示例性实施例的原理。而且,某些尺寸可能被夸大以便有助于视觉传达这样的原理。附图中,遍布几个示图的标识号指示相似或相应的,但不必是相同的元素。

具体实施方式

[0037] 本发明示例性实施例支持在不确定参数的细节保持未知的情况下,就储层开发计划做出决策。这样的不确定性可直接在优化模型内考虑,该优化模型可以是鲁棒性优化模型。在示例性实施例中,鲁棒性优化模型系统地处理所有不确定数据。这样的范例允许产生灵活或鲁棒性的优化解决方案,该解决方案保持覆盖不确定性空间的可行性,并且这样的范例允许在输入数据中的最优性和随机性或不确定性之间做出权衡。

[0038] 在某些示例性实施例中,鲁棒性优化提供储层开发计划方法并有效处理不确定性。在某些实施例中,优化可类似于用于随机编程的追偿 (recourse) 模型。然而对象中的罚函数可取代所有可能实现的可行性,可能实现有时被称为“情景 (scenarios)”。鲁棒性优化的一个示例性实施例整合目标编程和问题数据的基于情景的说明。

[0039] 本发明可以以许多不同形式实施,且不能解释为限于这里给出的实施例;相反,提供这些实施例以便本公开透彻完整,并充分地向本领域技术人员表达本发明范畴。而且,这里给出的所有“例子”或“示例性实施例”是非限制性的,并且尤其由本发明的代表支持。

[0040] 现在将参考图 1-4 详细说明本发明的示例性实施例。图 1 是根据本发明的某些示

例性实施例,与储层模型数据关联的整个不确定性空间的使用示图。椭圆形形状表示不确定性空间 100,如下面的讨论,不确定性空间 100 的特征是为计划或做决策考虑的信息或数据的不确定性。椭圆形内阴影表示全部不确定性空间 100 都被考虑,而非仅不确定性空间 100 内的随机数据点。也就是,鲁棒性优化模型允许针对被视作可能的所有值 104 考虑整个不确定性空间 100。借助全面考察不确定性,鲁棒性优化模型提供最优解决方案。

[0041] 图 2 是根据本发明某些示例性实施例的三维储层模型 200 的示图,该模型 200 包括定义多个节点 204 的网格 206。储层模型 200 可用于模拟具有一个或更多垂直井 202 的油和 / 或气储层的操作。如图所示,储层模型 200 可由网格 206 分成多个节点 204。网格 206 表示单元形式的地质信息从而根据网格 206 支持基于计算机的储层和地质信息的处理。储层模型 200 的节点 204 可具有不一致的尺寸。这个三维储层模型 200 可提供结合储层模拟器使用的额外数据。

[0042] 图 3 是根据本发明的某些示例性实施例的流程图,其示出模拟图 2 的储层模型 200 操作的储层模拟器 300。在示例性实施例中,模拟器 300 包括一组在计算机系统上执行的指令。也就是,模拟器 300 包括在一台或更多台计算机上运行的一个或更多软件程序。此外,计算机可具有执行该模拟的一个或更多处理器。

[0043] 参考图 2 和图 3,储层模拟器 300 模拟储层模型的操作,其中为储层模型 200 的井 202 和地面设施网络执行井管理 302。井管理 302 是对储层模型 200 中的所有井 202 执行的,并包括迭代过程 304,其中执行雅可比构造 (Jacobian construction) 和流量计算 306,然后执行线性求解 308 和一个或更多特性计算 310。线性求解 308 和 / 或一个或更多特性计算 310 是对大数据阵列或数组执行的,这些数据表示特性,例如,网格 206 中网格点的压力和组成。

[0044] 在储层模型 200 中针对井 202 的迭代过程 304 完成且收敛后,井 202 的数据在结果 / 检查点 I/O (输入 / 输出) 312 中生成。在完成针对井 202 的井管理 302 后,井管理 302 可针对整个储层模型 200 的剩余井 202 执行,其中每个井 202 的结果是在结果 / 检查点 I/O 312 生成的。储层模拟器 300 可用一个或更多通用计算机、专用计算机、模拟处理器、数字处理器、中央处理单元和 / 或分布式计算系统实现。也就是,储层模拟器 300 可包括计算机可执行指令或代码。

[0045] 储层模拟器 300 的输出可包括在图形用户界面 (GUI) 上显示的结果、数据文件、介质如光盘或磁盘上的数据、纸质报告或传输到另一个计算机或另一个软件例程的信号 (未完全列出)。

[0046] 储层模型 200 和储层模拟器 300 可用于模拟储层的操作,从而允许对碳氢化合物储层、井和相关地面设施中流动的流体、能量和 / 或气体的建模。储层模拟 300 是储层优化的一部分,储层优化也包括构建数据从而精确地表示储层。示例性模拟目标包括理解形成流动方式,以便优化针对从井 202 和地面设施的某个集合生产碳氢化合物的某个策略。模拟通常是耗时的迭代过程的一部分从而减小关于特定储层模型描述的不确定性,同时优化生产策略。例如,储层模拟是一种计算流体动力学模拟。

[0047] 储层模型 200 和储层模拟器 300 可进一步用于优化相应储层、井和相关地面设施的设计和操作。

[0048] 图 4 是根据本发明某些示例性实施例的鲁棒性基于优化的储层开发计划系统 400

的示意图。在示例性实施例中,储层开发计划系统 400 是计算机程序、基于软件的引擎或计算模块。而且,图 4 中每个所示方框可包括计算机程序、基于软件的引擎或计算模块。因此,鲁棒性基于优化的储层开发计划系统 400 可以用例如一个或更多通用计算机、专用计算机、模拟处理器、数字处理器、中央处理单元和 / 或分布式计算系统实现。

[0049] 鲁棒性基于优化的储层开发计划系统 400 包括针对储层开发计划的一个或更多鲁棒性优化模型 402。给定某个目标对象并受到系统约束,针对储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 是用于优化开发计划的鲁棒性优化模型。

[0050] 此外,鲁棒性基于优化的储层开发计划 400 可包括输入数据的至少一个源 404、储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 和求解例程 408。储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 是高保真度模型或储层模拟模型,其用于在后续迭代中更新和调整储层开发计划的鲁棒性优化模型 402。由于储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 可包含在其约束方程系统内的储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 的近似,所以这样的更新和调整提供改进。包括在储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 内的低保真度模型提供储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 的这个近似。

[0051] 储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 可从输入数据的源 404 接收输入数据。输入数据可包括在一个或更多电子数据表、一个或更多数据库中的数据项、经计算机网络或因特网馈入的信息、手动输入、来自 GUI 的用户输入等等。

[0052] 在处理输入数据后,储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 可提供输出给所考虑储层的储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406。储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 可进而提供其输出数据到储层开发计划的鲁棒性优化模型 402。最后,储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 可与求解例程 408 接口。

[0053] 本示例性实施例提供鲁棒性基于优化的储层开发计划系统 400,其中与储层关联的数据中固有的不确定性直接并入到储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 中。通过在储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 中结合或并入数据中的不确定性,捕获与不确定性的各种实现上的决策关联的权衡,且因此在关于石油和 / 或天然气储层开发计划做出决策时,可获得更好的信息。

[0054] 鲁棒性优化的目的是选择能够最好地应付不确定数据的各种实现的解决方案。假设不确定数据是未知的但受限制,且理论结果也可假设不确定性空间的凸性 (convexity)。不确定参数的优化问题再形成对应的鲁棒性优化问题。在这种情形中,除了已知的或确定的数据参数,还有约束中出现的不确定数据参数 θ (theta)。约束被再形成,以便在给定不确定参数的任何可能实现的情况下,它们必须被满足。现在还提出决策变量数组“x”和“y”,以便其取决于不确定参数的实现。

[0055] $\min f(x, y)$

[0056] s. t. $g(x, y; \theta) \leq 0 \forall \theta \in \{\text{不确定性空间}\}$

[0057] $x \in X$

[0058] $y(\theta) \in Y$

[0059] 根据示例性实施例,通过为整个给定的不确定性空间(例如,基本覆盖不确定性空间)强制优化问题的可行性,鲁棒性优化确保(或替代地提供或支持)优化解决方案中的鲁棒性和灵活性。解决方案避免违反(或不违反)针对任何数据实现的任何约束。而且,

鲁棒性优化允许给定的最糟情形的缓解。

[0060] 在示例性实施例中,鲁棒性基于优化的储层开发计划系统 400 提供决策支持工具来优化满足所有商业问题约束的对象函数的风险规避、风险中性 (risk neutral) 或风险寻求度量 (如,净现值, NPV)。

[0061] 在示例性实施例中,储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 可以是储层模型 200 (图 2) 的数据独立的数学抽象。输入数据的源 404 可提供储层数据,其可以是例如从电子数据表、数据库、手动输入或其他方式存储和检索的。储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 可包括一个或更多储层或地面设施模拟器,如储层模拟器 300 可包括或可以是基于软件的工具、程序或功能;如 Schlumberger Technology 公司销售的注册商标为“ECLIPSE”的, Landmark Graphics 公司销售的注册商标为“VIP”、或 Landmark Graphics 公司销售的注册商标为“NEXUS”的那些软件工具、程序。而且,求解例程 408 可包括用于求解储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 的一个或更多例程、方法、过程或算法。在示例性实施例中,储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 和求解例程 408 的设计和可操作可完全或部分结合。此外,鲁棒性基于优化的储层开发计划系统 400 的设计和可操作可例如利用一个或更多通用可编程计算机实施,所述计算机可分布或不分布在一个或更多通信网络之内或其间。

[0062] 图 5 是根据示例性实施例操作图 4 的鲁棒性基于优化的储层开发计划系统的方法 500 的流程图。

[0063] 这里所述的方法和过程中的某些步骤 (参考图 5 以及其他附图) 必然自然领先于本发明其他方法中的步骤,从而如所述那样发生功效。然而,本发明不限于所述步骤顺序,如果这样的顺序或序列不会不利地改变本发明的功能。也就是,认识到某些步骤可在其他步骤之前或之后执行,或与其他步骤并行执行,而不偏离本发明的范畴和精神。本发明可包括多个过程,其可以用计算机和 / 或手动操作实施。本发明可包括一个或更多计算机程序,这些计算机程序可实施这里所述的某些功能和例子、图表、示图和流程图中示出的某些功能。然而,显然可以有多种方式用计算机编程、手动、非基于计算机的机器或与计算机和手动实施的结合来实施本发明的各方面。本发明不能解释为局限于任何一组计算机程序指令。进一步,具有普通技能的程序员应能够基于本文给出的公开和教导编写这类计算机程序,而不会有困难或不当实验。

[0064] 因此,一组特定程序代码指令的公开不会被当作是适当理解如何实现和使用本发明所必要的。本发明任何编程方面的创造性功能将在下面的说明中结合附图进一步详细解释,所述附图示出功能和程序流程和过程。

[0065] 参考图 5,操作的方法 500 将示例性参考图 1、2、3 和 4 讨论,其从步骤 505 开始并进行到步骤 510。在步骤 510,开发计划情形输入数据被提供给储层开发计划的鲁棒性优化模型 402。输入数据可从手动数据输入、电子数据表 and 数据库的组合提供,并可包括但不限于不确定参数的规范 (如不确定值的范围)、决策变量 (如实施时的时间)、风险态度、目标函数等。这些输入数据可形成用于在储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 内增加一个或更多数学模型的数据实例。

[0066] 在步骤 515,初始化储层和 / 或地面设施参数输入数据被提供给储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406。在步骤 520,储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 模拟储层和 / 或地面设施。储层和 / 或地面设施动态的该高保真度模型 406 可包括储层和地

面设施动态的一个或更多高保真度模型,例如,上述储层和设施模拟器。此外,在执行模拟后,获得关于储层和地面设施操作的数据,其中所述数据包括但不限于生产估计、结构、流动特性等等。

[0067] 在步骤 525,储层和 / 或地面设施特性的模拟结果是作为储层和 / 或地面设施特性输入数据提供给储层开发计划的鲁棒性优化模型的,其也可被称为第一高保真度输出数据。

[0068] 在步骤 530,生成初始低保真度模型组件,其包括在储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 中。初始保真度模型组件是针对储层和 / 或地面设施动态的预测。该预测是利用输入数据和第一高保真度输出数据生成的。储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 包括低保真度模型,该低保真度模型在计算上是高效的,并提供储层和地面设施动态的近似。换句话说,与高保真度模型比较,低保真度模型提供较小的计算精度从而产生相对粗糙的结果,且因此在典型计算系统上执行要快得多。低保真度模型可从用于储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 中的部分软件代码生成。例如,高保真度模型的软件可被调整以便运行较少的迭代。高保真度模型可被调整或配置,以通过运行两维横截面,减小参数输入的数目,规定更大的单元尺寸等提供低保真度模型。

[0069] 在完成步骤 505 到 530 后,储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 是在步骤 535 利用输入数据和储层和 / 或地面设施动态的低保真度模型求解的。储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 包括一个或更多鲁棒性优化模型,该鲁棒性优化模型可包括例如 MINLP 类模型和基于 MINLP 的求解例程或算法。

[0070] 储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 可用一个或更多适合用途或专用 (fit-for-purpose) 的求解例程求解,这些例程可在储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 和求解例程 408 的一个或更多个中提供。适合用途的求解例程可包括商业或公开可用的数学编程求解器例程和特别设计的模型特定技术的组合。因此,求解储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 可在不具有针对不确定性表示的概率密度函数的条件下实现。储层开发计划的鲁棒性优化模型 403 的求解生成储层模型解决方案,其中针对储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 的试验性开发计划和储层和 / 或地面设施参数输入数据,其也可称为储层开发计划输出数据,是基于该储层模型解决方案生成的。

[0071] 在步骤 540,通过求解储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 生成的储层和 / 或地面设施参数输入数据被提供给储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406。

[0072] 在步骤 545,储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 再次模拟储层和 / 或地面设施。该模拟生成对应的高保真度输出数据,该数据也可被称为储层和 / 或地面设施特性输入数据。

[0073] 在步骤 550,判定高保真度模型的输出是否基本与低保真度模型的预测一致。如果组成部分不是基本一致,则在步骤 555,储层和 / 或地面设施特性输入数据再次被提供给储层开发计划的鲁棒性优化模型 402。在步骤 560,低保真度模型组成部分被再次生成,以便包括到储层开发计划的鲁棒性优化模型中。

[0074] 在步骤 535,储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 再次被求解。在步骤 550,该过程继续迭代直到高保真度模型的输出基本与低保真度模型的预测一致。例如,当低保真度模型和高保真度模型的结果收敛时,步骤 550 可判定足够水平的处理已经完成。此时,步骤

550 认为迭代完成。

[0075] 一旦低保真度模型的预测与储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 的输出一致时, 储层开发计划的鲁棒性优化模型 402 再次被求解从而生成输出, 其可包括在步骤 565 的最终开发计划。该输出可用于生成报告、计算、表格、图形、图表等等, 用于数据不确定性下开发计划或储层管理的分析。而且, 输出的示例性实施例包括在图形用户界面 (GUI) 上显示的结果、数据文件、介质如光盘或磁盘上的数据、纸质报告、或传输给另一个计算机或另一个软件程序的信号或某些其他有形输出, 这里仅列出几个作为例子。

[0076] 根据某些实施例, 可测试和优化多种情形, 以便它们的结果可以作为过程的一部分进行并行比较。操作的方法 500 然后在步骤 750 结束。虽然操作的方法 500 已经以多个步骤示出, 但某些步骤可以以不同顺序执行, 而不偏离示例性实施例的范畴和精神。

[0077] 在不同示例性实施例中, 方法 500 可用数学编程语言或系统实现, 如 AIMMS (高级建模开发系统)、GAMS (通用代数建模系统)、AMPL、OPL、Mose1 或使用计算机编程语言实现, 如 C++ 或 Java 或两者的某个组合。适合用途的求解例程可以以数学编程语言或直接以计算机编程语言开发, 或借助商业可用软件工具的支持开发。例如, 商业和开源版本的数学编程语言和计算机编程代码编译器通常都是可获得的。

[0078] 可以理解, 可对前面的说明做出修改而不偏离本发明的范畴和精神。例如, 本发明示例性实施例的教导可用来提高其他类型的 n 维计算机模型的计算效率。

[0079] 虽然已经示出并说明了本发明的说明性实施例, 但前面的公开内容设想了宽范围的修改、变化和替换。在某些情形中, 可采用本发明的某些特征而不相应使用其他特征。因此, 所附权利要求被宽泛解读并以与本发明范畴和精神一致的方式解读是适当的。

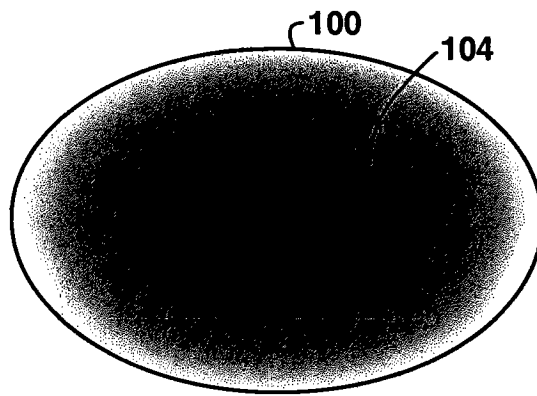


图 1

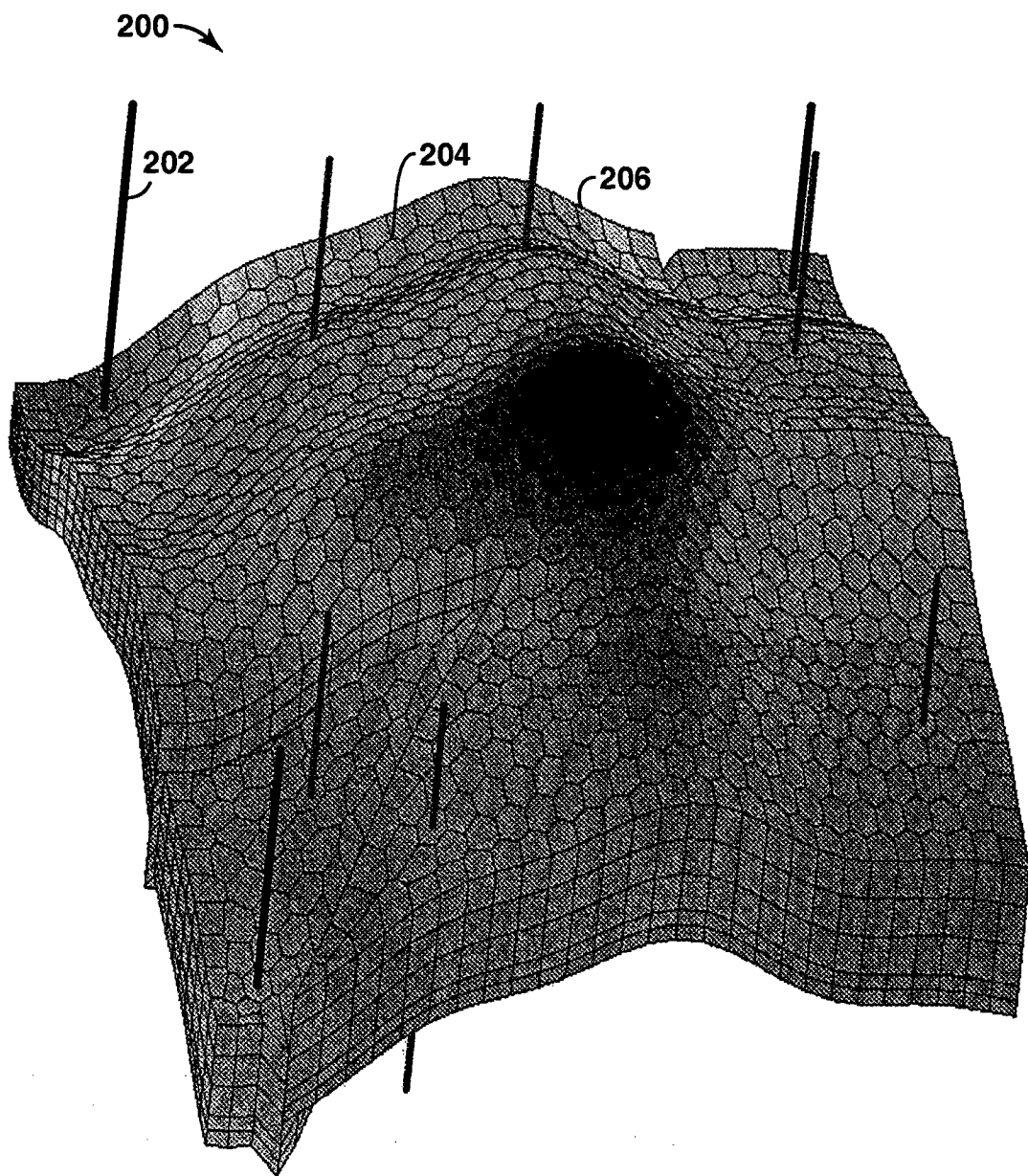


图 2

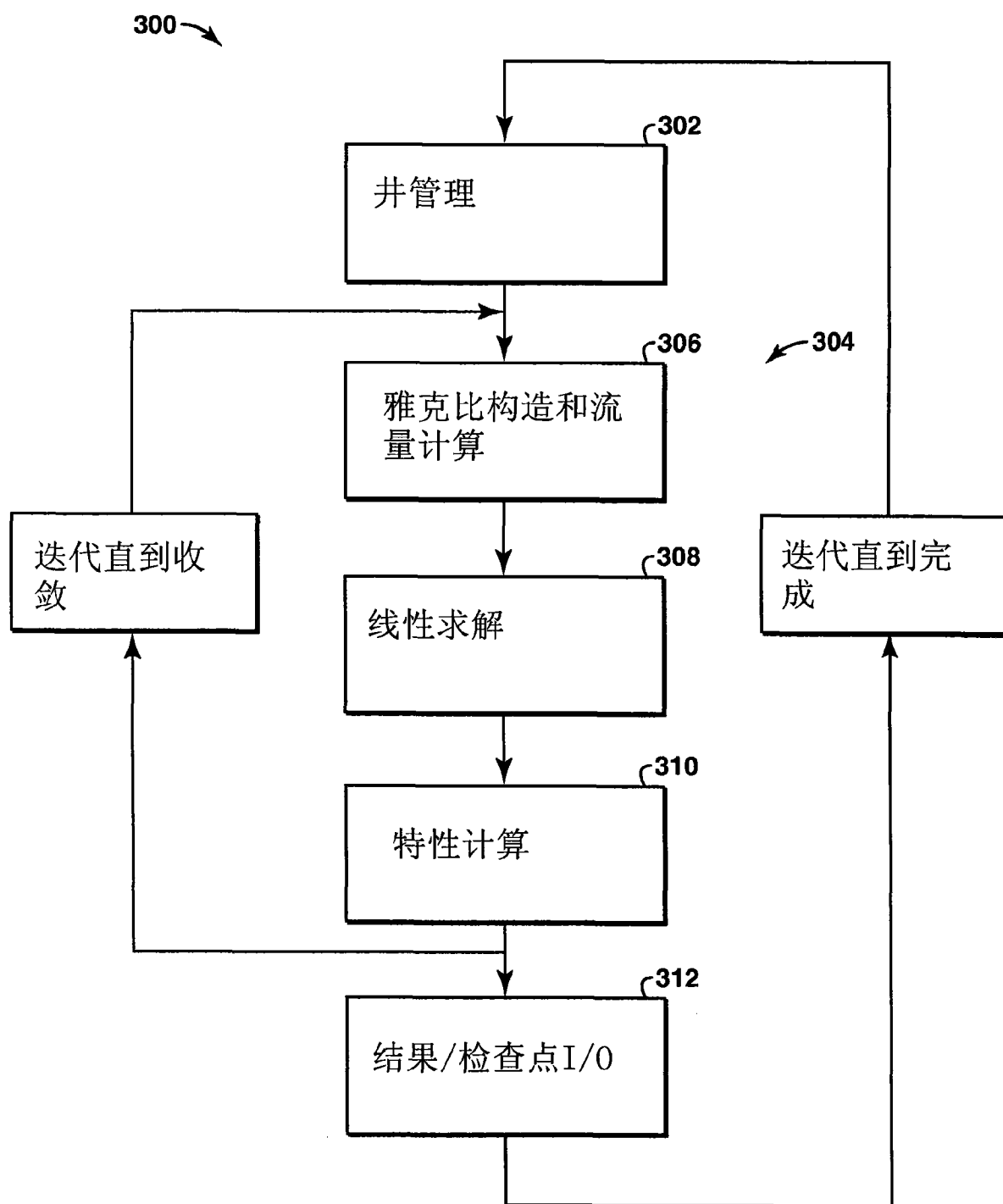


图 3

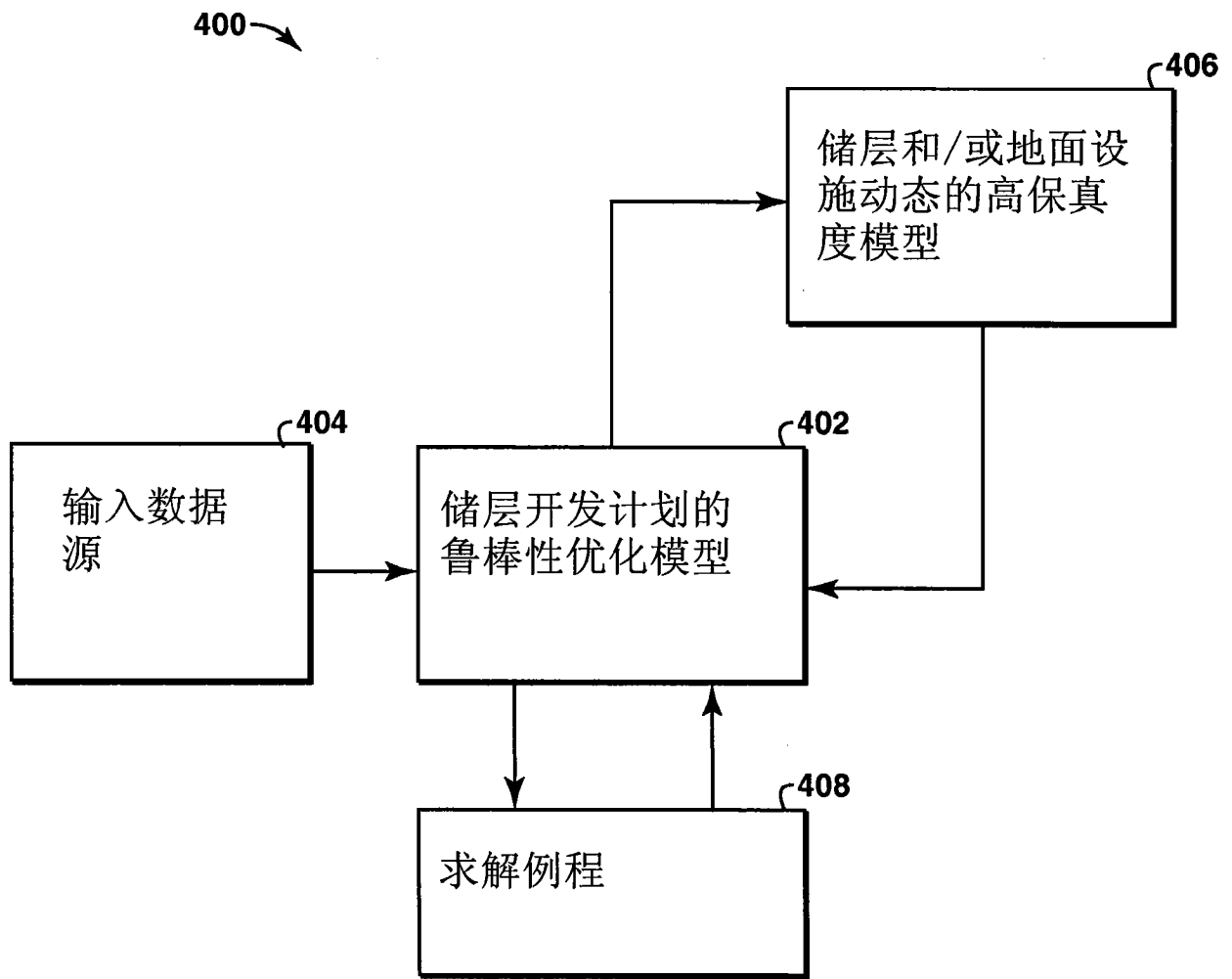


图 4

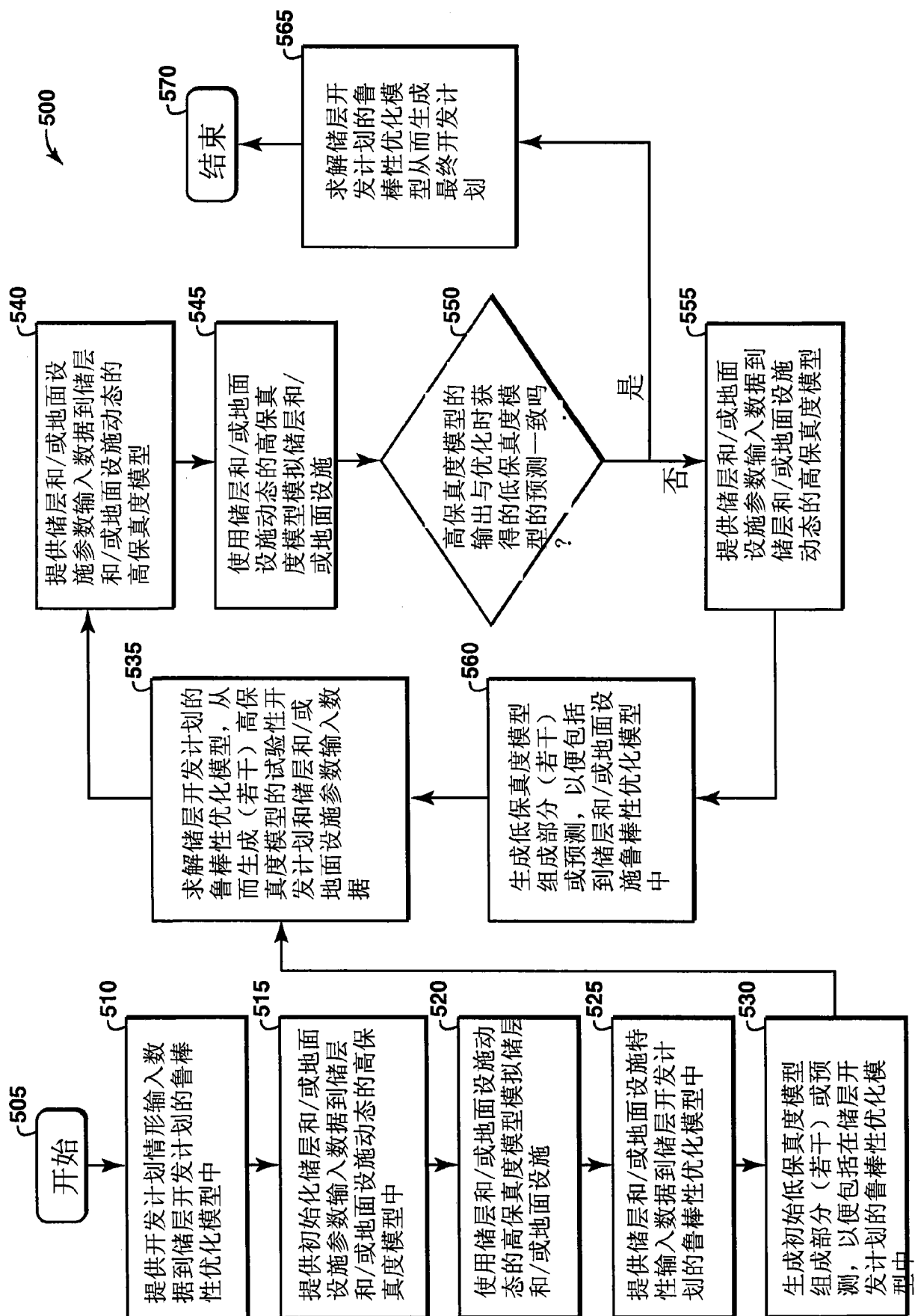


图 5