(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 102016746 A
(43)申请公布日 2011.04.13

(21)申请号 200980114094.2
(22)申请日 2009.03.09
(30)优先权数据
61/124,929 2008.04.21 US
(85)PCT申请进入国家阶段日
2010.10.21
(86)PCT申请的申请数据
PCT/US2009/036536 2009.03.09
(87)PCT申请的公布数据
WO2009/131761 EN 2009.10.29
(71)申请人 埃克森美孚上游研究公司
地址 美国德克萨斯州
(72)发明人 V·戈尔 K·C·弗尔曼
(74)专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245
代理人 赵蓉民
(51)Int.Cl.
G06E 1/00(2006.01)

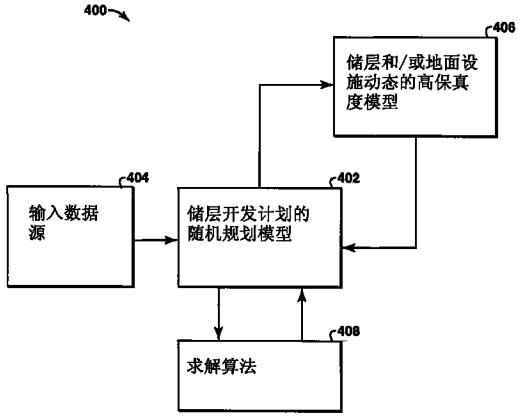
权利要求书 3 页 说明书 15 页 附图 10 页

(54)发明名称

储层开发计划的基于随机规划的决策支持工具

(57)摘要

本发明涉及一种用于储层开发计划的基于随机规划的决策支持工具，该工具可包含输入数据源、优化模型、模拟储层的高保真度模型以及与优化模型接口的一个或更多求解例程。优化模型可考虑直接在优化模型内具有不确定性的未知参数。该模型纳入决策者在真实世界中具有的灵活性，并允许决策者基于新信息调节决策。该模型可系统处理不确定数据，例如全面以至考虑全部不确定的数据。因此，该优化模型可提供灵活或鲁棒的解决方案，该解决方案在不确定性空间上仍可行。一旦储层模型被优化，那么可生成最终开发计划。



CN 102016746 A

1. 一种储层开发计划的方法，包含以下步骤：

接收代表所述储层的数据，接收的数据具有与其关联的不确定性；

经计算机实现的随机规划处理所述接收的数据，包括用纳入所述不确定性的随机规划模型处理所述接收的数据；

响应经计算机实现的随机规划处理所述接收的数据而生成储层开发计划；以及

输出所述储层开发计划，从而管理所述储层的开发。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述生成步骤包含根据与所述接收的数据关联的不确定性空间，生成所述储层开发计划。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其中所述计算机实现的随机规划包含基于所述接收的数据和不确定性空间，优化所述储层开发计划的至少某个方面。

4. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述接收的数据包括所述储层的流体动力学、所述储层的尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到所述储层内的成本、钻探机对所述储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理所述储层的资本成本中的一个或更多。

5. 根据权利要求 1 所述的方法，其中不确定性空间与所述接收的数据关联，以及

其中经所述计算机实现的随机规划处理所述接收的数据包含经由情景或样本考虑所述不确定性空间。

6. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述计算机实现的随机规划包含：

多个阶段，每个阶段都代表时步；

每个阶段中的多个决策变量，其中一组变量代表在所述储层开发计划中当前阶段要做出的一组潜在决策；以及

多个概率分布函数，每个概率分布函数都代表所述数据中的不确定性，并且在每个阶段中所述数据中的所述不确定性的一些被分解，

其中未来决策变量根据前面的决策变量和所述数据中剩余不确定性的所述概率分布函数确定。

7. 根据权利要求 1 所述的方法，其中在所述优化完成前，允许决策者在所述计算机实现的随机规划内采取一个或更多纠正决策。

8. 根据权利要求 1 所述的方法，其中所述储层开发计划向计算机显示器输出。

9. 一种碳氢化合物储层的开发计划方法，包含以下步骤：

(a) 接收代表所述碳氢化合物储层的数据，其中不确定性与所述数据关联；以及

(b) 用纳入不确定性的基于计算机的随机规划模型处理所述接收的数据；

(c) 响应用纳入所述不确定性的所述基于计算机的随机规划模型处理所述接收的数据而产生储层开发计划的至少某个部分；

(d) 输出所述储层开发计划的所述至少某个部分；以及

(e) 在所述不确定性降低时，重复步骤 (b)、(c) 和 (d)。

10. 根据权利要求 9 所述的方法，其中在所述基于计算机的随机规划模型中纳入所述不确定性包含在所述不确定性的多个实现之间获得权衡。

11. 根据权利要求 9 所述的方法，其中响应用纳入所述不确定性的所述基于计算机的随机规划模型处理所述接收的数据而产生所述储层开发计划的至少某个部分的所述步骤包含

在整个不确定性空间实现优化问题的可行性。

12. 根据权利要求 9 所述的方法，其中响应用纳入所述不确定性的所述基于计算机的随机规划模型处理所述接收的数据而产生所述储层开发计划的至少某个部分的所述步骤包含

在所述随机规划模型内系统处理不确定的数据。

13. 根据权利要求 9 所述的方法，其中所述数据包括所述储层的流体动力学、所述储层的尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到所述储层内的成本、钻探机对所述储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理所述储层的资本成本中的一个或更多。

14. 一种关于石油资源开发的决策支持的方法，包含以下步骤：

接收关于决策的多个数据元素，所述决策与开发石油储层有关，其中不确定性的相应特征与所述数据元素中的每个关联；以及

响应用基于计算机的随机规划模型处理每个所述数据元素和所述不确定性的每个所述相应特征，为所述决策输出建议。

15. 根据权利要求 14 所述的方法，其中所述随机规划模型纳入所述不确定性的每个所述相应特征。

16. 根据权利要求 14 所述的方法，其中用基于计算机的随机规划模型处理每个所述数据元素和所述不确定性的每个所述相应特征包含覆盖不确定性空间。

17. 一种基于计算机的优化碳氢化合物储层的开发计划的方法，包含：

提供代表所述碳氢化合物储层的输入数据，所述输入数据具有与其关联的不确定性；

利用所述输入数据，使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；

使用所述输入数据和所述第一高保真度输出数据，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；

利用所述输入数据和所述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，并且所述储层开发计划模型包含纳入不确定性的随机规划模型；

利用所述输入数据和所述储层开发计划输出数据，使用所述储层或地面设施动态的高保真度模型，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；

比较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；

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基本一致：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、使用所述储层或地面设施动态的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与所述低保真度模型的所述预测。

18. 根据权利要求 17 所述的方法，进一步包含：

响应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基本一致，生成开发计划。

19. 根据权利要求 17 所述的方法，其中与所述随机规划模型接口的求解例程帮助所述

随机规划模型优化所述储层的开发计划。

20. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述随机规划模型包含求解例程，用于帮助优化所述储层的开发计划。

21. 根据权利要求 17 所述的方法，其中所述输入数据包括所述储层的流体动力学、所述储层的尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到所述储层内的成本、钻探机对所述储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理所述储层的资本成本中的一个或更多。

22. 一种从地下储层生产碳氢化合物的方法，包含：

基于代表所述储层的输入数据，生成储层开发计划系统；

经随机规划模型并根据不确定性空间，优化所述储层开发计划系统；以及

根据源自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。

23. 根据权利要求 22 所述的方法，其中所述输入数据包含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含

用所述随机规划模型考虑所述非确定性分量中的每个。

24. 根据权利要求 22 所述的方法，其中所述随机规划模型纳入所述输入数据的不确定性。

25. 根据权利要求 22 所述的方法，其中所述不确定性空间规定所述输入数据的固有不确定性。

26. 根据权利要求 22 所述的方法，其中所述储层开发计划系统包含：

包含低保真度储层模型的所述随机规划模型；以及

高保真度储层模型，

其中所述高保真度模型从所述随机规划模型接受一个或更多参数输入数据，并向所述随机规划模型提供一个或更多储层或地面设施属性输入数据。

27. 根据权利要求 22 所述的方法，其中优化所述储层开发计划系统包含：

使用高保真度模型模拟所述储层的操作；以及

使用低保真度模型模拟所述储层的操作。

28. 根据权利要求 22 所述的方法，其中所述数据包括所述储层的流体动力学、所述储层的尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到所述储层内的成本、钻探机对所述储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理所述储层的资本成本中的一个或更多。

29. 一种具有记录在有形的计算机可读介质上的计算机可执行逻辑的计算机程序产品，所述计算机程序产品包含：

接收代表所述储层的数据的代码，所接收的数据具有与其关联的不确定性；

经计算机实现的随机规划处理所接收的数据的代码，包括用纳入所述不确定性的随机规划模型处理所接收的数据；

响应经计算机实现的随机规划处理所接收的数据而生成储层开发计划的代码；以及

输出所述储层开发计划以管理所述储层的开发的代码。

储层开发计划的基于随机规划的决策支持工具

[0001] 相关申请的交叉参考

[0002] 本申请要求 2008 年 4 月 21 号申请的美国临时专利申请 61/124,929 的权益，其标题为 STOCHASTIC PROGRAMMMING-BASED DECISIONSUPPORT TOOL FOR RESERVOIR DEVELOPMENT PLANNING，其全部内容通过引用包括在此。

[0003] 本发明涉及以下申请：美国临时专利申请 61/124,500，该申请提交于 2008 年 4 月 17 日，标题为 ROBUST OPTIMIZATION-BASEDDECISION SUPPORT TOOL FOR RESERVOIR DEVELOPMENTPLANNING；以及提交于 2008 年 4 月 18 日的美国临时专利申请 61/124,681 和提交于 2009 年 1 月 30 日的 PCT 申请 PCT/US09/32736，标题为 MARKOV DECISION PROCESS-BASED DECISION SUPPORT TOOLFOR RESERVOIR DEVELOPMENT PLANNING。 这些申请通过引用全部包括在此。

技术领域

[0004] 本描述一般涉及油气生产，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。

[0009] 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，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。

[0010] 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。

[0011] $\min f(x, y)$

[0012] $s.t.g(x, y) \leq 0$

[0013] 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次优的，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。

[0014] 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

[0015] 常规储层开发计划技术通常不能适当考虑这类不确定性。 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。 不确定性可视作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途径没有充分全面地检查这种不确定性。

[0016] 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，对于上述三种情形中的每种，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少到已知值。

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。

[0017] 基于不确定性空间的有限取样，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决方案（或解）或不如某个其他未经确认的解决方案有利的解决方案。

[0018] 考虑到前面的讨论，本领域显然需要改进的工具，该工具可帮助储层开发计划，和 / 或可提供与储层开发和资源管理有关的决策支持。 进一步需要可为计划或决策支持考虑宽范围不确定性的工具。 进一步需要系统地处理用来产生计划或决策支持的模型内的不确定数据的工具。 进一步需要可运用与产生储层开发计划或决策支持有关的完整不确定性空间的工具。 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联的权衡被捕获或获得，并因此在做出关于石油和 / 或天然气储层开发计划的决策时可获得更好的信息。 本领域中前述需要的讨论意指代表而不详尽。 致力于处理一个或更多这样的需要或该领域中一些其它相关缺点的技术应有益于储层开发计划，例如提供决策或计划，以便更有效和更有益开发和管理储层。

[0019] 本发明支持为开发和管理石油资源，例如石油储层做出决策、计划、战略和 / 或策略。

[0020] 在本发明的一方面，基于计算机或基于软件的方法可提供与开发一个或更多石油储层有关的决策支持。 例如，该方法可基于和储层和 / 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含未知或不定的流体动力学、储层尺寸、当前开发状态、当前和预计油价、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，通过应用基于随机规划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。

[0021] 在一个通常方面，储层开发计划的方法包括接收和储层或储层开发相关的数据。 接收的数据具有与其关联的不确定性。 接收的数据经计算机实现或实施的随机规划处理，包括用纳入（或并入）不确定性的随机规划模型处理接收的数据。 响应经计算机实现的随机规划处理接收的数据而生成储层开发计划。 输出储层开发计划，从而管理储层的开发。

[0022] 该方面的实施可包括下面特性中的一个或更多。 例如，储层开发计划可根据和接收的数据关联的不确定性空间生成。 计算机实现的随机规划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。 可接收已知数据参数和不确定的数

据参数，其中经计算机实现的随机规划处理接收的数据可包括用纳入不确定的数据参数的随机规划模型处理数据。 不确定性空间可与接收的数据关联。 接收的数据可经计算机实现的随机规划处理，计算机实现的随机规划可包括经情景或样本考虑不确定性空间。计算机实现的随机规划可包括多个阶段，每个阶段都代表时步；每阶段中的多个决策变量，其中一组变量代表在储层开发计划中的当前阶段做出的一组潜在决策；和 / 或多个概率分布函数，每个概率分布函数都代表数据中的不确定性，并且在每个阶段中，数据中不确定性中的一些被分解。 未来决策变量可根据先前决策变量和数据中剩余不确定性的概率分布函数确定。 在优化完成前，可允许决策者在计算机实现的随机规划内采取一个或更多纠正决策。 接收的数据可包括储层流体动力学、储层尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到所述储层内的成本、钻探机对所述储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理所述储层的资本成本中的一个或更多。

[0023] 在另一通常方面中，碳氢化合物储层开发计划的方法包括接收代表碳氢化合物储层的数据，其中不确定性与数据关联。 接收的数据可用纳入（或并入）不确定性的基于计算机的随机规划模型处理。 响应用纳入不确定性的基于计算机的随机规划模型处理接收的数据，产生储层开发计划的至少某部分。 输出储层开发计划。 处理、产生和输出的步骤在不确定性减少时重复。

[0024] 该方面的实施可包括下面特性中的一个或更多。 例如，在基于计算机的随机规划模型中纳入不确定性可包括在不确定性的多个实现之间获得权衡。 响应用纳入不确定性的基于计算机的随机规划模型处理接收的数据而产生储层开发计划的至少某部分的步骤可包括在整个不确定性空间实现优化问题的可行性。 不确定的数据可在随机规划模型内进行系统地处理。 数据可包括储层流体动力学、储层尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到所述储层内的成本、钻探机对所述储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理所述储层的资本成本中的一个或更多。

[0025] 在另一通常方面中，关于石油资源开发的决策支持的方法包括接收和关于开发石油储层的决策有关的多个数据元素，其中不确定性的相应特征与数据元素中的每个关联。 响应用基于计算机的随机规划模型处理数据元素中的每个和不确定性的相应特征中的每个，输出针对决策的建议。

[0026] 该方面的实施可包括下面特性中的一个或更多。 例如，随机规划模型可纳入不确定性的每个相应特征。 用基于计算机的随机规划模型处理数据元素中的每个和不确定性的相应特征中的每个可包括覆盖不确定性空间。

[0027] 在另一通常方面中，优化碳氢化合物储层的开发计划的基于计算机的方法包括提供代表碳氢化合物储层的输入数据，输入数据具有与其关联的不确定性。 储层的第一模拟利用输入数据使用储层或地面设施动态的高保真度模型生成，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使用输入数据和第一高保真度输出数据生成，其中低保真度模型生成预测。 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储层开发计划模型，其中储层开发计划模型生成储层开发计划输出数据，并且储层开发计划模型包含纳入不确定性的随机规划模型。 储层的第二模拟利用输入数据和储层开发计划输出数据使用储层或地面设施动态的高保真度模型执行，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。 重复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高保真度模型执行储层的第二模拟以及比较第二高保真度输出数据与低保真度模型的预测的步骤，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。

[0028] 该方面的实施可包括下面特性中的一个或更多。 例如，响应第二高保真度输出数据与低保真度模型的预测基本一致，生成开发计划。 与随机规划模型接口的求解例程可帮助随机规划模型优化储层开发计划。 随机规划模型可包括帮助优化储层开发计划的求解例程。 输入数据可包括储层流体动力学、储层尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到储层内的成本、钻探机对储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理储层的资本成本中的一个或更多。

[0029] 在另一通常方面中，从地下储层生产碳氢化合物的方法可包括基于代表储层的输入数据，生成储层开发计划系统。 储层开发计划系统经由随机规划模型，并根据不确定性空间优化。 根据源自优化的储层开发计划系统的输出，从储层生产碳氢化合物。

[0030] 该方面的实施可包括下面特性中的一个或更多。 例如，输入数据可包括确定性分量和非确定性分量。 非确定性分量中的每个都可与随机规划模型一起考虑。 随机规划模型可纳入输入数据的不确定性。 不确定性空间可指定输入数据的固有不确定性。 储层开发计划系统可包括随机规划模型，该随机规划模型包括低保真度储层模型和高保真度储层模型。 高保真度模型从随机规划模型接受一个或更多参数输入数据，并向随机规划模型提供一个或更多储层或地面设施属性输入数据。 储层开发计划系统可通过使用高保真度模型模拟储层的操作；并且使用低保真度模型模拟储层的操作来优化。 输入数据包括储层流体动力学、储层尺寸、储层开发的当前状态、油价、钻探到储层内的成本、钻探机对储层操作的钻探时间成本，以及关于钻探或管理储层的资本成本中的一个或更多。

[0031] 在另一通常方面中，从地下储层生产碳氢化合物的方法可包括基于代表储层的输入数据来生成储层开发计划系统。 储层开发计划系统经由随机规划模型，并根据不确定性空间优化。 根据来自优化的储层开发计划系统的输出，从储层生产碳氢化合物。

[0032] 在另一通常方面中，计算机程序产品具有在有形的计算机可读介质上记录的计算机可执行逻辑。 计算机程序产品包括接收代表储层的数据的代码，接收的数据具有与其关联的不确定性，并且该产品包括经计算机实现的随机规划处理接收的数据的代码，其包括用纳入不确定性的随机规划模型处理接收的数据，并且该产品包括响应经计算机实现的随机规划处理接收的数据而生成储层开发计划的代码，并且该产品包括输出储层开发计划以管理储层开发的代码。

[0033] 该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、特性、优点和目标包括在本发明范畴内，并通过所附权利要求保护。

附图说明

[0034] 图 1 是根据本发明某些示范实施例的多阶段随机规划决策树的图解，该树代表

与在若干步骤中分解的储层模型的数据和不确定性随时间推移的分解关联的不确定性。

[0035] 图 2 是根据本发明某些示范实施例的包括定义多个节点的网格的三维储层模型的图解。

[0036] 图 3 是根据本发明某些示范实施例的模拟图 2 的储层模型的操作的储层模拟器的流程图解。

[0037] 图 4 是根据本发明某些示范实施例的基于随机规划的储层开发计划系统的示意图解。

[0038] 图 5 是根据本发明某些示范实施例的操作图 4 的基于随机规划的储层开发计划系统的方法的流程图解。

[0039] 图 6 是根据示范实施例代表例子的油田 A 的三种可能状况或情景的生产剖面 (production profile) 的图表。

[0040] 图 7 是根据示范实施例代表例子的油田 B 的三种可能情景的生产剖面的图表。

[0041] 图 8 是根据示范实施例代表例子的油田 C 的三种可能情景的生产剖面的图表。

[0042] 图 9 是根据示范实施例代表例子的油田 D 的三种可能情景的生产剖面的图表。

[0043] 图 10 是根据示范实施例代表例子的油田 E 的三种可能情景的生产剖面的图表。

[0044] 图 11 是根据示范实施例代表例子的油田 A 的不确定的生产剖面的初始概率分布的图表。

[0045] 图 12 是根据示范实施例代表例子的油田 B、C、D、E 的不确定的生产剖面的概率分布的图表。

[0046] 图 13 是根据示范实施例代表如果开采一年后获得悲观信息的情况下，例子的油田 A 的不确定的生产剖面的概率分布的图表。

[0047] 图 14 是根据示范实施例代表如果开采一年后获得乐观信息的情况下，例子的油田 A 的不确定的生产剖面的概率分布的图表。

[0048] 本发明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

[0049] 本发明示范实施例支持在不确定参数的详情保持未知时做出关于储层开发计划的决策。 不确定参数随时间逐渐显露，并且决策可能需要在将可用信息包含到决策过程的同时每隔一段时间做出。 这些不确定性及其随时间的演变可直接在可直接在优化模型，例如随机规划构架或模型内考虑。 在示范实施例中，随机规划模型系统地处理全部不确定数据和它的随时间推移的演变。 随机规划模型不仅在优化模型中纳入不确定性表示，并针对所有情景明确评估解决方案表现，它也纳入决策者在真实世界中基于随时间推移获得的新信息调节决策的灵活性。 决策者能基于该新信息做出纠正的决策 / 行动。这样的范例允许产生覆盖不确定性空间保持可行的灵活或鲁棒的解决方案，并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，从而反映决策者的风险态度。

[0050] 在某些示范实施例中，随机规划提供针对储层开发计划的途径，并有效处理不

确定性。 在一些实施例中，该构架可类似于鲁棒的优化模型。 然而，目标中的罚函数可替代全部认为可能的实现的可行性，认为可能的实现有时称为“情景”。 随机规划的一个示范实施例利用支配储层开发计划数据的概率分布通常是已知或可估计的属性。 在一些实施例中，随机规划模型可用来寻找对全部或接近全部可能的数据实例可行的策略，并且最大化决策和随机变量的一函数的期望值。

[0051] 本发明可用许多不同形式实施，并且不应解释为限于这里阐述的实施例；相反，提供这些实施例是为了使本公开是详尽且完整的，并向本领域技术人员全面地告知本发明的范畴。 此外，除了受到本发明的表示支持以外，这里给出的和本发明的代表支持的全部“例子”或“示范实施例”不意指限制。

[0052] 现在参考图 1-4 详述本发明的示范实施例。 图 1 是根据本发明某些示范实施例的示出多阶段随机编程决策树 100 的图解，该决策树 100 代表与在若干步骤中分解的储层模型的数据和不确定性随时间推移的分解关联的不确定性。 决策树 100 图解具有三年和四种情景的情景树。 决策 102 在时间 T1 基于在时间 T1 可用的信息做出。 在阶段 104，一些不确定量中的不确定性，例如油价中的不确定性被分解，并且决策 106a、106b 的集合基于在时间 T2 可用的信息实施。 在阶段 108a、108b，不确定量中的不确定性被再次分解，并且决策 110a、110b、110c、110d 的集合基于在时间 T3 可用的信息实施。

[0053] 在不确定性下应用多阶段随机规划框架可包括投资、生产或开发的长期计划，其中固定决策随时间发生在各阶段中。 因此，随着时间的推移，创建考虑更多明确信息的机会。 模型中的决策也可包括对应行动的决策，该行动可恢复关于不确定性的信息。嵌入多阶段随机规划模型中的追偿 (recourse) 允许决策者基于获得的信息调节他们的决策，或采取纠正行动。 在此使用的术语“追偿”指在随机事件发生后采取纠正行动的能力。 通过导致鲁棒的、灵活的、更高价值的决策的追偿和真实世界中做出决策的真实模型，随机规划模型可提供更优化的解决方案。 在一些实施例中，随机规划模型可进一步包括除价值约束之外的附加概率或机会约束，和 / 或优化模型的目标中风险的度量。

[0054] 图 2 是根据本发明某些示范实施例的包括定义多个节点 204 的网格 206 的三维储层模型 200 的图解。 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。 如所示，储层模型 200 可由网格 206 分为多个节点 204。 网格 206 代表单元格式的地质构造，从而支持根据网格 206 的储层和地质信息的基于计算机的处理。 储层模型 200 的节点 204 可具有不一致的尺寸。 该三维储层模型 200 可提供协同储层模拟器使用的附加数据。

[0055] 图 3 是根据本发明某些示范实施例模拟图 2 的储层模型 200 的操作的储层模拟器 300 的流程图解。 在示范实施例中，模拟器 300 包含在计算机系统上执行的一组指令。即，模拟器 300 包含在一台或更多计算机上运行的一个或更多软件程序。 另外，计算机可具有执行该模拟的一个或更多处理器。

[0056] 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 和一个或更多属性计算 310。 线性求解 308 和 / 或一个或更多属性计算 310 是对大数据阵列或数组执行的，这些数据表示属性，例如，网格 206 中网

格点的压力和组成。

[0057] 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。

[0058] 例如，储层模拟器 300 可使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、中央处理器和 / 或分布式计算系统实现。 即，储层模拟器 300 可包含计算机可执行指令或代码。

[0059] 储层模拟器 300 的输出可包含在图形用户界面 (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）。

[0060] 储层模型 200 和储层模拟器 300 可用来模拟储层操作，由此准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。 储层模拟器 300 是储层优化的一部分，该优化也包括构建精确代表储层的数据。 示范模拟目标包含理解地层流方式 (flow patterns)，以便优化从某个组的井 202 和地面设施生产碳氢化合物的一些战略。 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。

[0061] 储层模型 200 和储层模拟器 300 可进一步用来优化对应储层、井和相关地面设施的设计和操作。

[0062] 图 4 是根据本发明某些示范实施例的基于随机规划的储层开发计划系统 400 的示意图。 在示范实施例中，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。 此外，图 4 的图中每个图示的区块都可包含计算机程序、基于软件的引擎或计算模块。 因此，可使用例如，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、中央处理器和 / 或分布式计算系统实现基于随机规划的储层开发计划系统 400。

[0063] 基于随机规划的储层开发计划系统 400 包括一个或更多储层开发计划的随机规划模型 402。 储层开发计划的随机规划模型 402 是随机规划构架，用于在给定某个客观并受系统约束的目标的情况下优化开发计划。

[0064] 另外，基于随机规划的储层开发计划系统 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 以及求解例程 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，或储层模拟模型的集合，其中集合中的每个元素都代表不确定性空间的一种可能的实现。 高保真度模型也可以仅是封装不确定性的一个储层模拟模型。 高保真度模型用来在随后的迭代中更新并调节储层开发计划的随机规划模型 402。这样的更新和调节提供改进，因为储层开发计划的随机规划模型 402 可在它的约束方程系统内含有储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 的近似。 包括在储层开发计划的随机规划模型 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。 类似于高保真度模型的情况，低保真度模型可以是单独低保真度模型的集合，以使每个元素都是高保真度模型的集合中元素的简化。 可替换地，低保真度模型可作为封装不确定性的单独模型存在。 尽管示范实施例中为高保真度模型和低保真度模型中的每个都列举两种形式，但为这些模型中的每个设

想附加形式与结合不背离示范实施例的范畴和精神。

[0065] 储层开发计划的随机规划模型 402 可从输入数据的源 404 接收输入数据。 输入数据可包含在一个或更多数据表、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。

[0066] 在处理输入数据后，储层开发计划的随机规划模型 402 可向所考虑储层的储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 提供输出。 储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 可进而提供返回储层开发计划的随机规划模型 402 的输出数据。 最终，储层开发计划的随机规划模型 402 可与求解例程 408 接口。

[0067] 本示范实施例提供基于随机规划的储层开发计划系统 400，其中与储层关联的数据中的固有不确定性、不确定性随时间推移的分解，以及基于此时可用信息的纠正决策的实施直接纳入储层开发计划的随机规划模型 402 内。 通过在每个时间点将数据中的不确定性纳入储层开发计划的随机规划模型 402 内，并分解该不确定性，获得与不确定性的各种实现上的决策关联的权衡，并因此更好的信息在做出关于石油和 / 或天然气储层开发计划时可用。

[0068] 通常，随机规划模型可被公式化，分析或数字求解，并经分析以便向决策者提供有用信息。 在一些示范实施例中，随机规划模型是两阶段模型或线性程序，其是多阶段随机规划模型的特别实施例。 在这样的实施例中，决策者在第一阶段期间采取某个行动，其后随机事件发生，影响第一阶段决策的结局。 此后，可在第二阶段中做出追偿决策，其补偿可作为第一阶段决策的结果经历的任何消极效果。 两阶段随机规划模型的目标是优化受约束的目标函数的期望值，其中不确定性在时间范围 (time horizon) 中的一点分解。 源自这样的模型中的最优策略是单个第一阶段策略和追偿决策的集合，有时称为“决策规则”，定义响应每个任意结局而应该采取哪个第二阶段行动。 两阶段模型的两个数学公式如下：

[0069] $$\min E_{\theta}[f(x, y; \theta)] \rightarrow \min \sum_{s} p_s f(x, y_s; \theta_s)$$ $s \in \{样本 / 情景\}$

[0070] $s.t.g(x, y; \theta) \leq 0$ $s.t.g(x, y_s; \theta_s) \leq 0$

[0071] 根据示范实施例，两阶段随机规划模型可在化学处理设计中应用。 不确定性可出现在原料的精确组成、属性和数量中。 第一阶段决策可包括设计决策，例如安装的处理单元类型，以及选择的单元的设计规格。 第二阶段决策可包括操作决策，例如，可受控制而调节到随机或不确定数据的特殊实现的流速和温度。

[0072] 在示范实施例中，基于随机规划的储层开发计划系统 400 提供决策支持工具，从而优化满足全部商业问题约束的目标函数的风险规避 (risk averse)、风险中性 (risk neutral) 或风险寻求度量 (例如，净现值 -NPV)。

[0073] 在示范实施例中，储层开发计划的随机规划模型 402 可以是储层模型 200(图 2) 的数据独立数学抽象。 输入数据的源 404 可提供储层数据，该储层数据可以例如存储在数据表、数据库、人工录入，或从数据表、数据库、人工录入检索，或以其他方式存储和检索。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，例如，储层模拟器 300 可包含或基于基于软件的工具、程序或功能；例如由 (1) Schlumberger Technology 公司销售，注册商标为“ECLIPSE”；(2) Landmark Graphics 公

司销售，注册商标为“VIP”；(3)Landmark Graphics 公司销售，注册商标为“NEXUS”的工具、程序或功能。 同样，求解例程 408 可包含一个或更多例程、方法、处理或算法，用于确定随机规划模型 402 的动态。

[0074] 在示范实施例中，储层开发计划的随机规划模型 402 的设计和操作以及求解例程 408 可完全或部分结合。 另外，基于随机规划的储层开发计划系统 400 的设计和操作可例如，使用一个或更多通用可编程计算机设施，该计算机可以分布或者不分布在一个或更多通信网内或之间。

[0075] 图 5 是根据示范实施例的操作图 4 的基于随机规划的储层开发计划系统的方法 500 的流程图解。

[0076] 在此描述的方法和过程中的某些步骤（参考图 5 和其它图）必须自然地先于其它步骤，以使本发明如所描述的来运作。 然而，如果这样的顺序或序列不会不利地改变本发明的机能，则本发明不限于描述的步骤的顺序。 即，认识到一些步骤可以在其它步骤之前或之后执行或与其它步骤并行执行，而不背离本发明的范围和精神。

[0077] 本发明可包括可用计算机和 / 或人工操作实现的多个过程。 本发明可包含实现描述的以及在示例、图表、图形和流程图中图示说明的某些功能的一个或更多计算机程序。 然而，显而易见的是存在多种使用计算机编程、人工、不基于计算机的机器或计算机和人工实施的结合来实现本发明的各方面的不同方式。 本发明不应解释为受限于任何一组计算机程序指令。 进一步地，本领域的普通编程人员将能够基于此公开和本文的教导在毫无困难或无需不适当试验的情况下编写这样的计算机程序。

[0078] 因此，不认为公开程序代码指令的特定集合对于适当理解如何实现和使用本发明是必需的。 本发明任何编程方面的创造性机能将在以下描述中结合图示说明功能和程序流以及过程的图形一起做进一步详细说明。

[0079] 参考图 5，示例参考图 1、2、3 和 4 讨论的操作方法 500 在步骤 505 开始，并进展到步骤 510。 在步骤 510，向储层开发计划的随机规划模型 402 提供开发计划情况输入数据。 输入数据可从人工数据录入、数据表和数据库的组合提供，并且可以包括但不限于不确定参数（例如，不确定值的范围）的具体说明、决策变量（例如，实施它们的时间）、风险态度、目标函数等等。这些输入数据可形成数据实例，该数据实例用来在储层开发计划的随机规划模型 402 内构成 (populate) 一个或更多数学模型。

[0080] 在步骤 515，向储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 提供初始储层和 / 或地面设施参数输入数据。 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。 该储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 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，例如上面讨论的储层和设施模拟器。 另外，在执行模拟后，获得关于储层和地面设施的操作的数据，其中数据包括但不限于生产估计、结构、流动属性等等。

[0081] 在步骤 525，储层和 / 或地面设施属性的模拟结果作为储层和 / 或地面设施属性输入数据提供给储层开发计划的随机规划模型，该数据也可称为第一高保真度输出数据。

[0082] 在步骤 530，生成初始低保真度模型组成部分（或组件），以便包括在储层开发计划的随机规划模型 402 中。 初始低保真度模型组成部分是储层和 / 或地面设施动态的

预测。 该预测使用输入数据和第一高保真度输出数据生成。 储层开发计划的随机规划模型 402 包括低保真度模型，该模型计算高效并提供储层和地面设施动态的近似。 换句话说，与高保真度模型相比，低保真度模型提供较低的计算精密度，从而产生相对粗略的结果，并因此在典型的计算系统上更快执行。 低保真度模型可从在储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 中使用的软件代码的一部分生成。 例如，可调整高保真度模型的软件以运行较少的迭代。 高保真度模型可被调整或配置为经由运行二维剖面图、减少参数输入的数量、指定较大单元尺寸等等提供低保真度模型。

[0083] 步骤 505 到 530 完成后，储层开发计划的随机规划模型 402 利用输入数据与储层和 / 或地面设施动态的低保真度模型在步骤 535 求解。 储层开发计划的随机规划模型 402 包括一个或更多随机规划模型，随机规划模型例如可包括 MINLP 类模型和基于 MINLP 的求解例程或算法。

[0084] 可使用一个或更多适合用途或专用的求解例程求解储层开发计划的随机规划模型 402，该例程可在储层开发计划的随机规划模型 402 和求解例程 408 中的一个或更多中提供。 适合用途的求解例程可包括商业或公开可用的数学规划求解器例程和专门设计的模型特定技术的组合。 因此，可在没有用于不确定性表示的概率密度函数的情况下实现储层开发计划的随机规划模型 402 的求解。 求解储层开发计划的随机规划模型 403 生成储层模型解决方案，其中试验性开发计划与储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 的储层和 / 或地面设施参数输入数据可基于该储层模型解决方案生成，该储层和 / 或地面设施参数输入数据也可称为储层开发计划输出数据。

[0085] 在步骤 540，向储层和 / 或地面设施动态的高保真度模型 406 提供通过求解储层开发计划的随机规划模型 402 生成的储层和 / 或地面设施参数输入数据。

[0086] 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，该数据也可称为储层和 / 或地面设施属性输入数据。

[0087] 在步骤 550，做出关于高保真度模型的输出是否与源自低保真度模型的预测基本一致的判定。 如果组成部分不基本一致，那么在步骤 555 再次向储层开发计划的随机规划模型 402 提供储层和 / 或地面设施属性输入数据。 在步骤 560，再次生成低保真度模型组成部分，以便包括在储层开发计划的随机规划模型内。

[0088] 在步骤 535，再次求解储层开发计划的随机规划模型 402。 该过程继续迭代，直到在步骤 550 高保真度模型的输出与源自低保真度模型的预测基本一致。 例如，在低保真度模型和高保真度模型的结果达成一致时，步骤 550 可判定已经完成充分水平的处理。 在该点，步骤 550 认为迭代完成。

[0089] 一旦源自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 一致，那么再次求解储层开发计划的随机规划模型 402，从而在步骤 565 生成可包括最终开发计划的输出。 该输出可用来生成报告、计算、表格、图形、图表等等，用于在数据不确定性下进行开发计划或储层管理的分析。 此外输出的示范实施例包含在图形用户界面 (GUI) 上显示的结果、数据文件、在介质例如光盘或磁盘上的数据、纸质报告，或向另一计算机或另一软件例程传输的信号，或一些其它有形输出，这里仅列出几个例子。

[0090] 根据一些实施例，可测试和优化多种情形，以便它们的结果可作为过程的部分

进行并行比较。 然后操作方法 500 在步骤 570 结束。 尽管操作方法 500 已经在多个步骤中说明，但步骤中的一些可以其它顺序执行而不违背示范实施例的范畴和精神。

[0091] 在各示范实施例中，可使用数学编程语言或系统实现方法 500，例如 AIMMS（高级建模开发系统）、GAMS（通用代数建模系统）、AMPL、OPL、Mosel，或使用计算机编程语言，例如 C++ 或 Java，或两者的某个结合。 适合用途的求解例程可用数学编程语言开发，或直接用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，数学编程语言和计算机编程代码编译器的商业和开源版本通常是可获得的。

[0092] 为了促进更好理解本发明，给出一些实施例的某些方面的以下例子。 下面的例子绝不应理解为限制或定义本发明的范畴。

[0093] 例子

[0094] 本例子基于假设输入，以及经执行基于计算机的随机规划例程产生的结果和结局。

[0095] 考虑具有五个油田 (A、 B、 C、 D 和 E) 的资产。 这些油田的计划开发包括三个浮式生产 (floating production) 船、存储船和卸载船 (FPSO)P1、 P2、 P3 的可能安装。创建针对安装或扩展 FPSO 的决策和它们何时可用于生产的进度表。 油田 A、 B 将在第 1 年开始生产，并流入平台 P1。 油田 C 将在第 7 年开始生产，并流入平台 P1 或 P2。 如果油田 C 流入 P1，那么不安装平台 P2。 油田 D 和 E 将分别在第 8 和 9 年开始生产，并可流入平台 P1、P2 或 P3。 如需要，可在安装后扩展平台 P1、P2 和 P3。 在该例子中，仅考虑石油开发，并且租约在 15 年内到期。

[0096] FPSO 在 15 万、22.5 万和 30 万油罐桶数 / 天 (kSTB/d) 的容量下可用。 FPSO 容量可以以 25、50 和 75kSTB/d 的增量扩展，以使 FPSO 的总容量不超过 300kSTB/d。

[0097] 要做出的决策包括 (i) 平台 P1、P2、P3 的油吞吐量和后来的扩展 (假设平台 P1 在第 1 年的开始立刻安装)，(ii) 哪个油田将从哪个平台生产 ；(iii) 每块油田随时间推移的生产率，使得满足储层与容量约束。

[0098] 确定全部油田的储层动态，其使源自油田的累积油生产和油田供应能力 (kSTB/d) 相关。 对于该研究，使用具有初始增加段、平稳段和下降段的分段线性曲线。

[0099] 图 6 是根据示范实施例代表油田 A 的三种可能产油情景或状况的生产剖面 600 的图表，三种可能产油情景为低含油率情景 610、基础含油率情景 620 和高含油率情景 630。

[0100] 图 7 是根据示范实施例代表油田 B 的三种可能产油情景的生产剖面 700 的图表，三种可能产油情景为低含油率情景 710、基础含油率情景 720 和高含油率情景 730。

[0101] 图 8 是根据示范实施例代表油田 C 的三种可能产油情景的生产剖面 800 的图表，三种可能产油情景为低含油率情景 810、基础含油率情景 820 和高含油率情景 830。

[0102] 图 9 是根据示范实施例代表油田 D 的三种可能产油情景的生产剖面 900 的图表，三种可能产油情景为低含油率情景 910、基础含油率情景 920 和高含油率情景 930。

[0103] 图 10 是根据示范实施例代表油田 E 的三种可能产油情景的生产剖面 1000 的图表，三种可能产油情景为低含油率情景 1010、基础含油率情景 1020 和高含油率情景 1030。

[0104] 也考虑全部油田的储层动态中的不确定性。 使用每个油田的离散的类型曲线集

（高、中、低）代表不确定性。 离散概率与实现中的每个关联。 例如，如图 11 所示，油田 A 的不确定的生产剖面的初始离散概率分布 1100 表示 40％概率的低情景 1110、20％概率的中等或基础情景 1120 以及 40％概率的高情景 1130。 参考图 12，除油田 A 之外全部油田的不确定的生产剖面的概率分布 1200 表示 30％概率的低情景 1210、40％概率的中等或基础情景 1220 以及 30％概率的高情景 1230。

[0105] 假设油田 A 中的不确定性在生产一年后将部分分解。 该增加的信息导致油田 A 的新概率分布。 例如，参考图 13，如果生产一年后获得悲观信息，那么油田 A 的不确定的生产剖面的概率分布 1300 表示 80％概率的低情景 1310、20％概率的中等或基础情景 1320 以及几乎 0％概率的高情景 1330。 可替换地，参考图 14，如果生产一年后获得乐观信息，那么油田 A 的不确定的生产剖面的概率分布 1400 表示几乎 0％概率的低情景 1410、20％概率的中等或基础情景 1420 以及 80％概率的高情景 1430。

[0106] 进一步假设新概率分布属于离散的候选概率分布集，其中的每个元素都具有相关联的概率。 在该研究中，假设新信息可导致两个概率分布中的一个，一个概率分布的高侧相似得多，并且另一个概率分布的低侧相似得多。 为了简单，假设全部其它油田的概率分布在项目寿命期不改变。 因此，该问题中不确定性情景的数量确定为 $3\times3\times3\times2\times3\times3 = 486$。

[0107] 该研究的目的是最大化项目的期望净现值（ENPV ：概率加权的平均净现值）。每个情景的 NPV 计算说明石油收入、涉及 FPSO 安装 / 扩展的资本成本、操作成本和税收。

[0108] 将源自随机规划途径的解决方案与为平均情况优化决策的确定性途径比较。 作为在第 1 年结束分解油田 A 中不确定性的结果的学习并入确定性途径的评估中。 随机和确定性途径的结果在下面表 1 中给出。

[0109] 表 1. 随机规划和确定性途径的比较

[0110]

	油价-$30/bbl	油价-$35/bbl	油价-$40/bbl
确定性途径	ENPV=$5.156B 以 150kSTB/d 安装 P1 如果 A 的信息是悲观的： 用 75kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75kSTB/d 扩展 P3 如果 A 的信息是乐观的： 用 75+50kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75kSTB/d 扩展 P3	ENPV=$6.910B 以 150kSTB/d 安装 P1 如果 A 的信息是悲观的： 用 75kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75kSTB/d 扩展 P3 如果 A 的信息是乐观的： 用 75+50kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75kSTB/d 扩展 P3	ENPV=$8.666B 以 150kSTB/d 安装 P1 如果 A 的信息是悲观的： 用 75kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 以 75+25kSTB/d 扩展 P3 如果 A 的信息是乐观的： 用 75+50kSTB/d 扩展 P1 以 225kSTB/d 安装 P3 用 25kSTB/d 扩展 P3

[0111]

随机规划	ENPV=$5.172B 以 150kSTB/d 安装 P1 如果 A 的信息是悲观的： 用 75kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75+50kSTB/d 扩展 P3 如果 A 的信息是乐观的： 以 75+50+25kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75+50kSTB/d 扩展 P3	ENPV=$7.032B 以 150kSTB/d 安装 P1 如果 A 的信息是悲观的： 用 75kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75+50kSTB/d 扩展 P3 如果 A 的信息是乐观的： 以 75+50+25kSTB/d 扩展 P1 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75+50kSTB/d 扩展 P3	ENPV=$8.896B 以 225kSTB/d 安装 P1 如果 A 的信息是悲观的： 以 150kSTB/d 安装 P3 用 75+50kSTB/d 扩展 P3 如果 A 的信息是乐观的： 用 75kSTB/d 扩展 P1 以 225kSTB/d 安装 P3 用 75kSTB/d 扩展 P3
ENPV 中的不同	$1600 万	$1.22 亿	$2.3 亿

[0112] 如上面表 1 所示，随机和确定性途径的结果完全不同，随机规划解决方案改善超过确定性途径解决方案，在 ENPV 中高达 2.3 亿。 随机规划导致更好解决方案的重要原因是由于全部不确定性情景在优化模型中明确评估，因此在该情况下能够更好评定大型 FPSO 的价值（以一组可能大型储层尺寸的形式）。 另一方面，确定性途径的决策基于平均情况，并因此不可精确评定大型 FPSO 的价值。

[0113] 这些结果也突出随机规划提供的解决方案中的灵活性。在油价为 $40/bbl 时，源自随机规划途径的优化解决方案提供基于为油田 A 获得的信息，调节平台 P1 和 P3 中容量扩展的灵活性。

[0114] 因此，本发明示范实施例良好适合实现目标，并获得上面提到的和在其中固有的利益和优点。 理解可在上述内容中做出变化而不背离本发明的范畴和精神。 例如，本说明性实施例的教导可用来提高其它类型 n 维计算机模型的计算效率。

[0115] 尽管示出和描述了本发明的说明性实施例，但在上述公开中设想广泛范围的修改、变化和置换。 在一些实例中，可采用本发明一些特性而不对应使用其它特性。 因此，广泛地并用与本发明范畴和精神一致的方式解释所附权利要求是合适的。

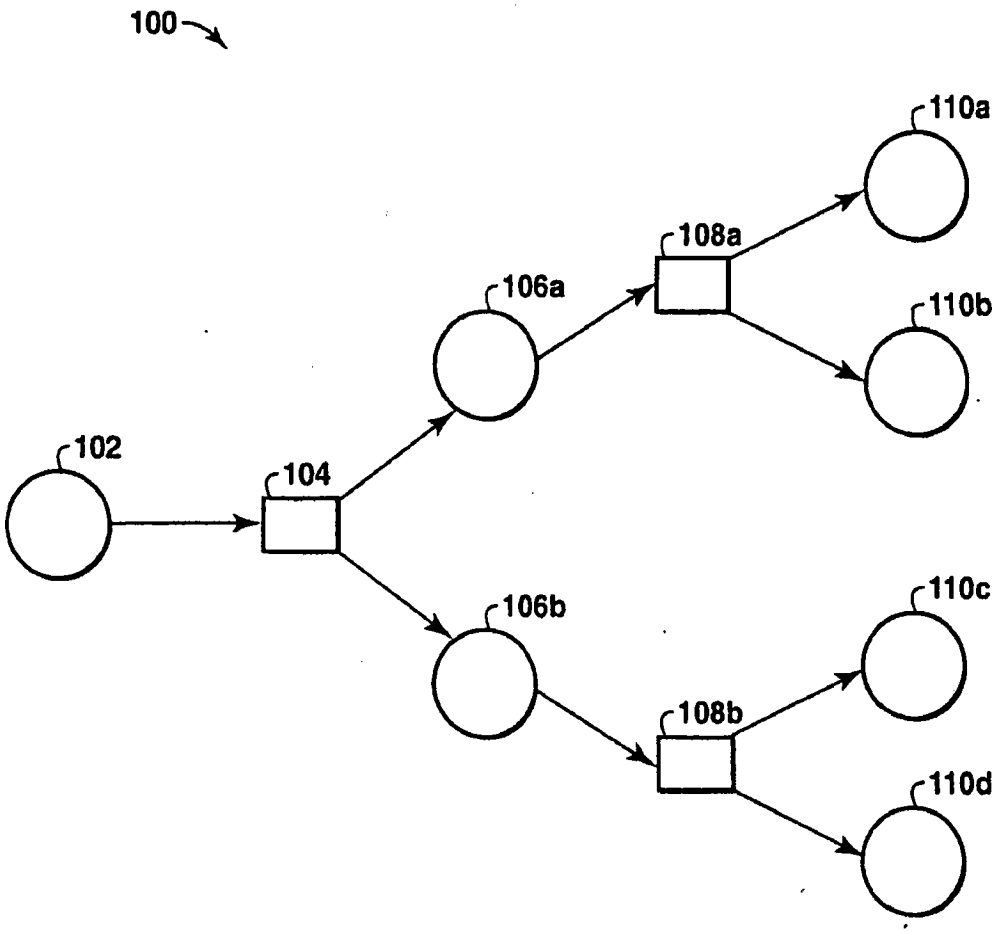


图 1

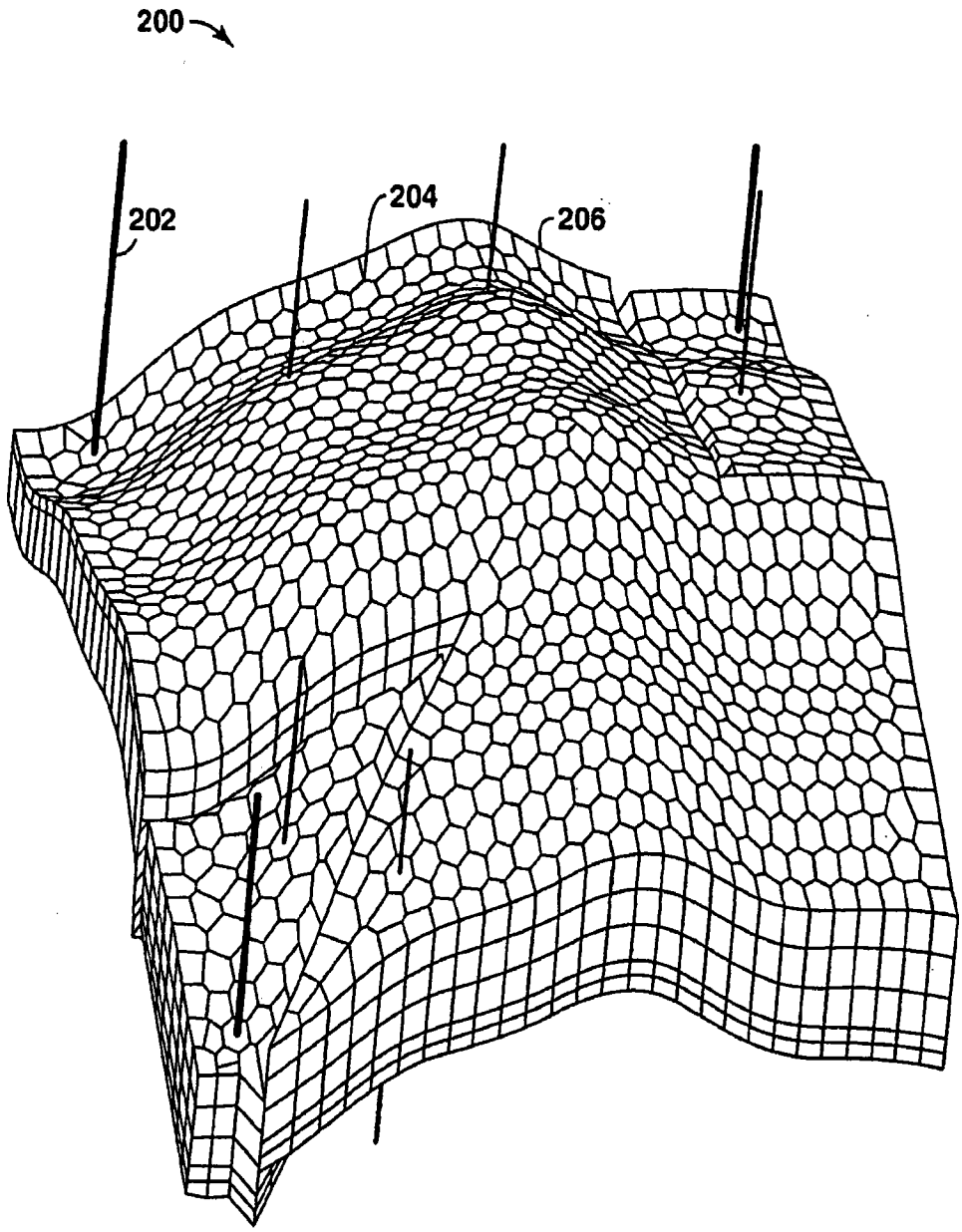


图 2

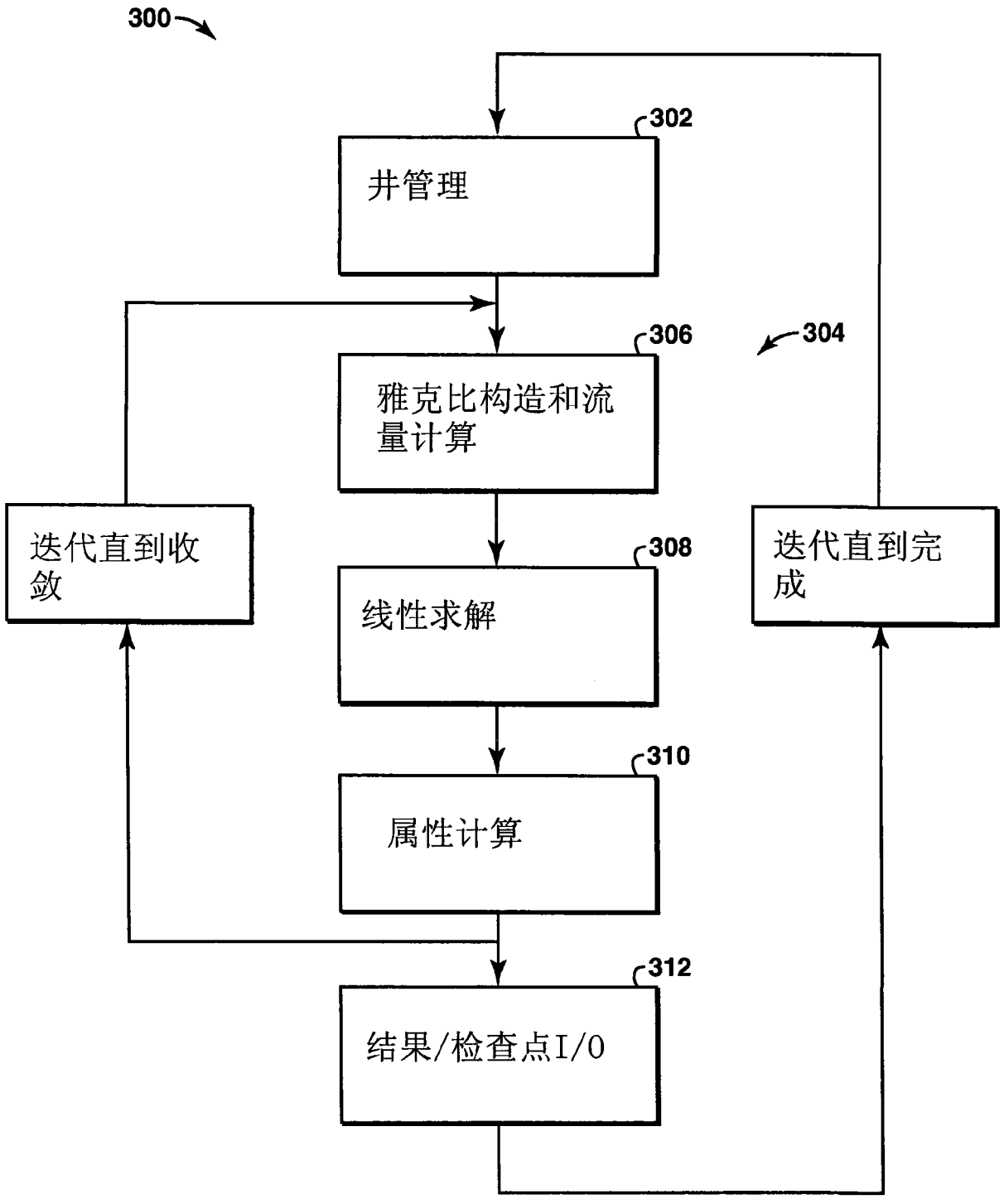

300
302
井管理
306
304
雅克比构造和流量计算
迭代直到收敛
308
迭代直到完成
线性求解
310
属性计算
312
结果/检查点I/O

图 3

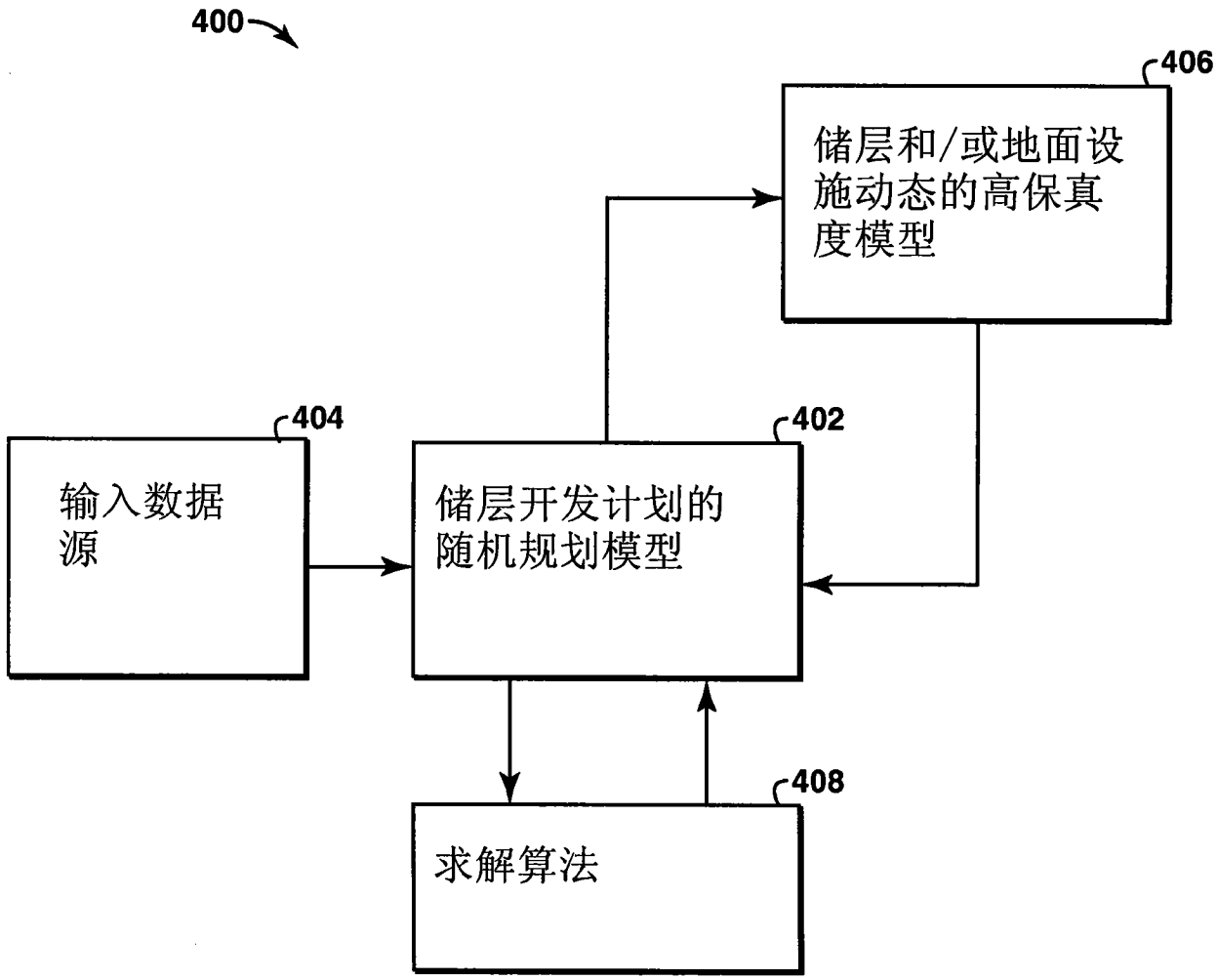

400
406
储层和/或地面设施动态的高保真度模型
404
402
输入数据源
储层开发计划的随机规划模型
408
求解算法

图 4

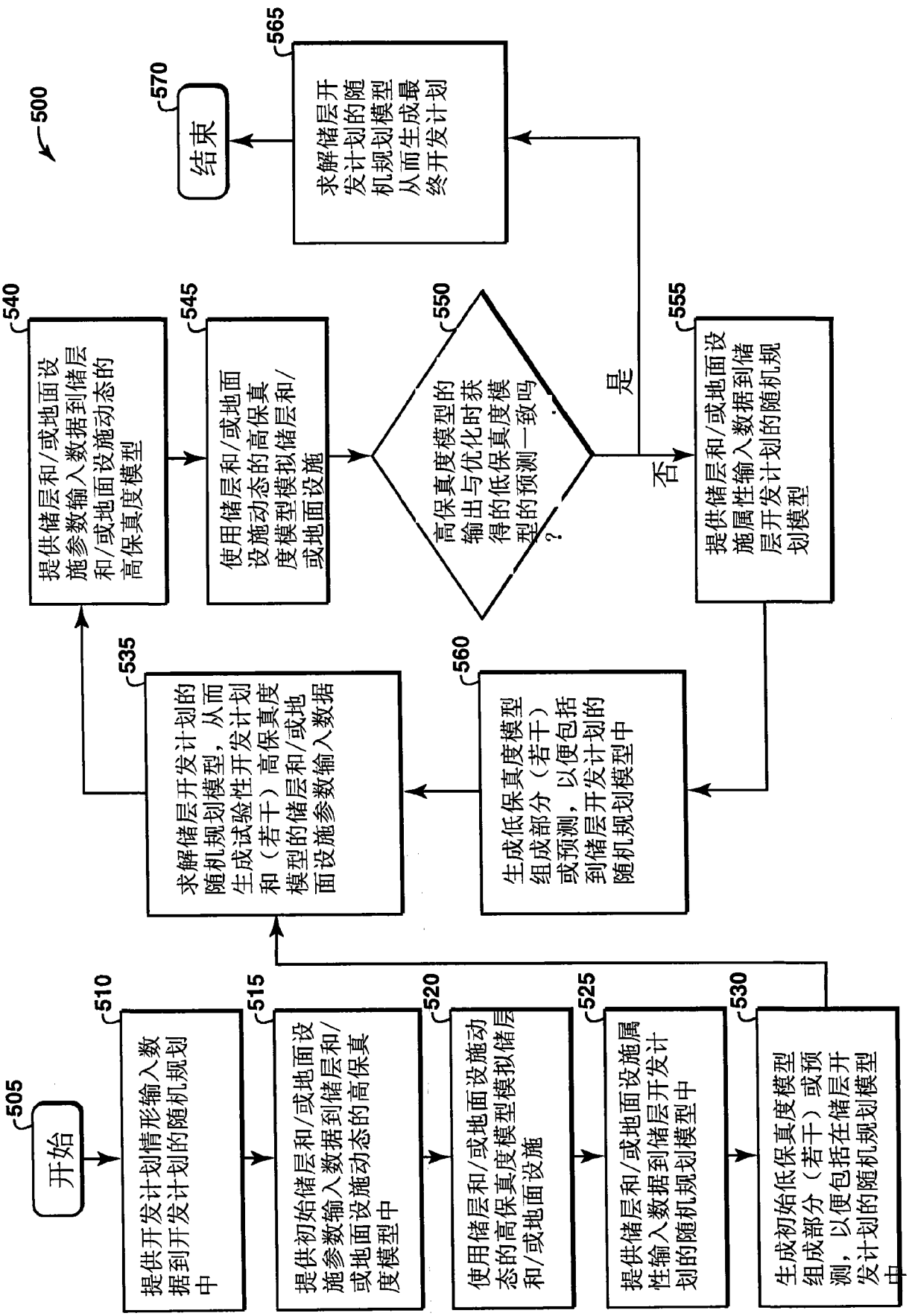

500
505
开始
510
提供开发计划情形输入数据到开发计划的随机规划中
515
提供初始储层和/或地面设施参数输入数据到储层和/或地面设施动态的高保真度模型中
520
使用储层和/或地面设施动态的高保真度模型模拟储层和/或地面设施
525
提供储层和/或地面设施属性输入数据到储层开发计划的随机规划模型中
530
生成初始低保真度模型组成部分（若干）或预测，以便包括在储层开发计划的随机规划模型中
535
求解储层开发计划的随机规划模型，从而生成试验性开发计划和（若干）高保真度模型的储层和/或地面设施参数输入数据
540
提供储层和/或地面设施参数输入数据到储层和/或地面设施动态的高保真度模型
545
使用储层和/或地面设施动态的高保真度模型模拟储层和/或地面设施
550
高保真度模型的输出与优化时获得的低保真度模型的预测一致吗？
是
否
555
提供储层和/或地面设施属性输入数据到储层开发计划的随机规划模型
560
生成低保真度模型组成部分（若干）或预测，以便包括到储层开发计划的随机规划模型中
565
求解储层开发计划的随机规划模型从而生成最终开发计划
570
结束

图 5

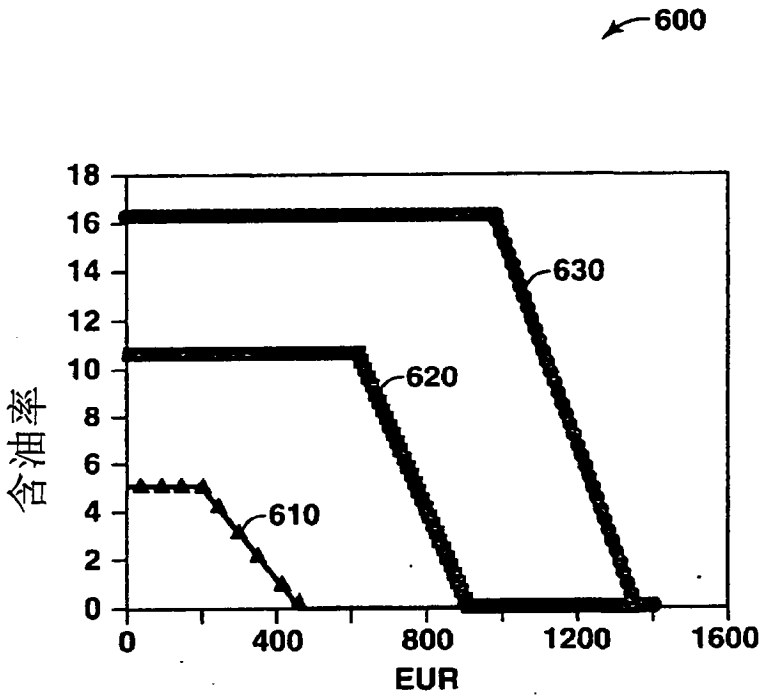

600
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
含油率
630
620
610
0
400
800
1200
1600
EUR

图 6

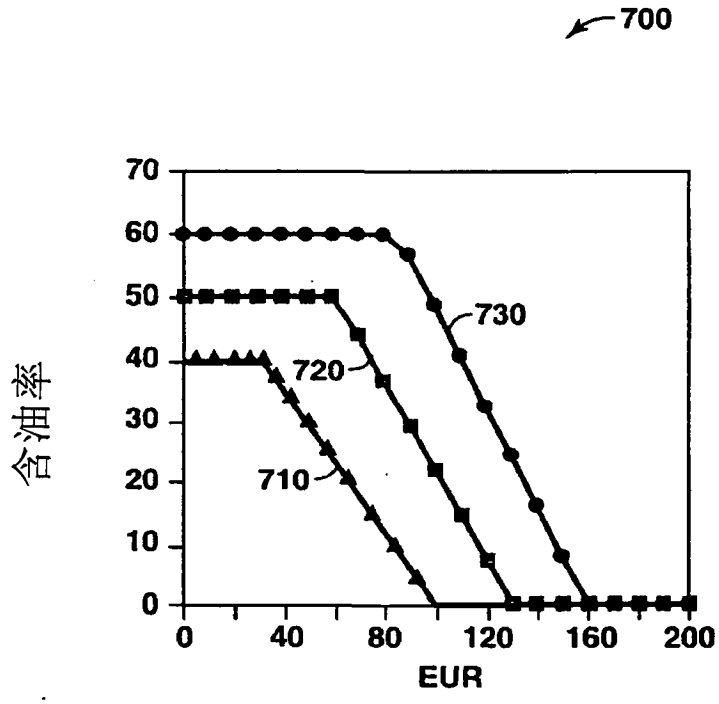

700
70
60
50
40
30
20
10
0
含油率
730
720
710
0
40
80
120
160
200
EUR

图 7

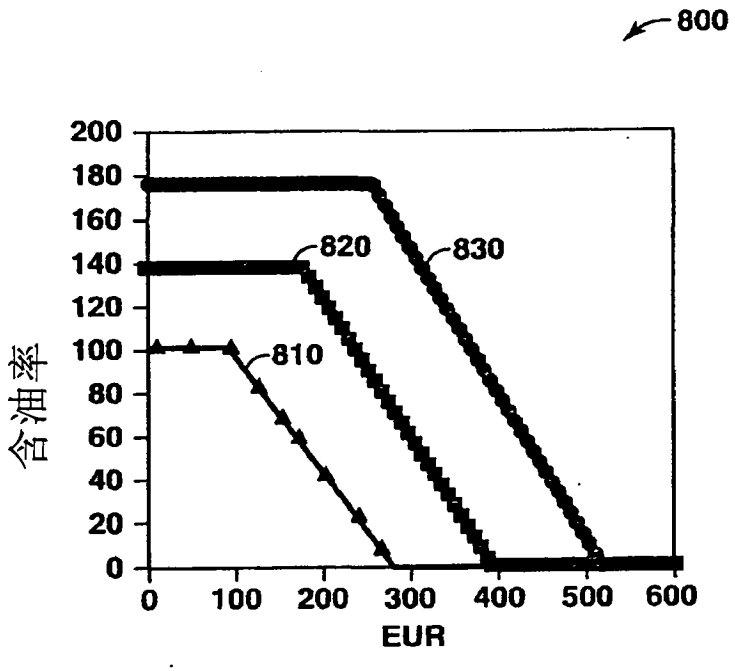

800
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
含油率
820
830
810
0
100
200
300
400
500
600
EUR

图 8

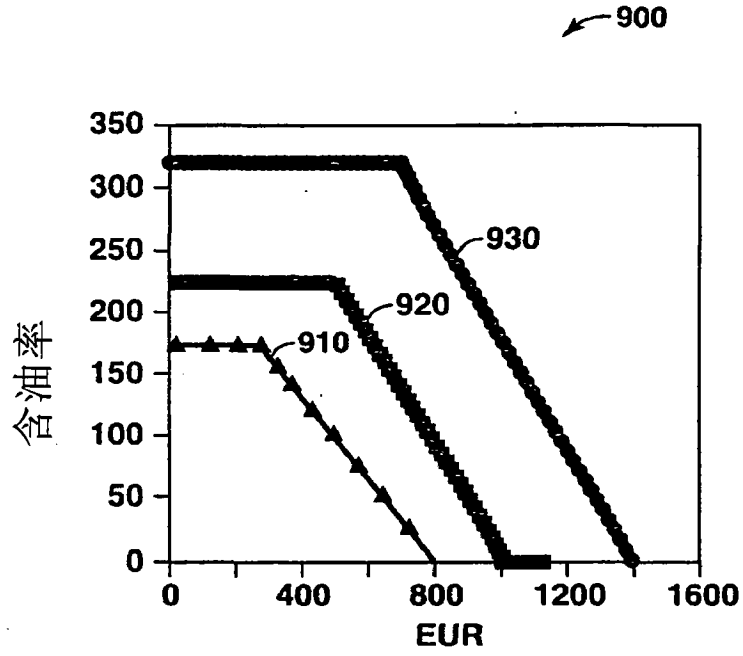

900
350
300
250
200
150
100
50
0
含油率
930
920
910
0
400
800
1200
1600
EUR

图 9

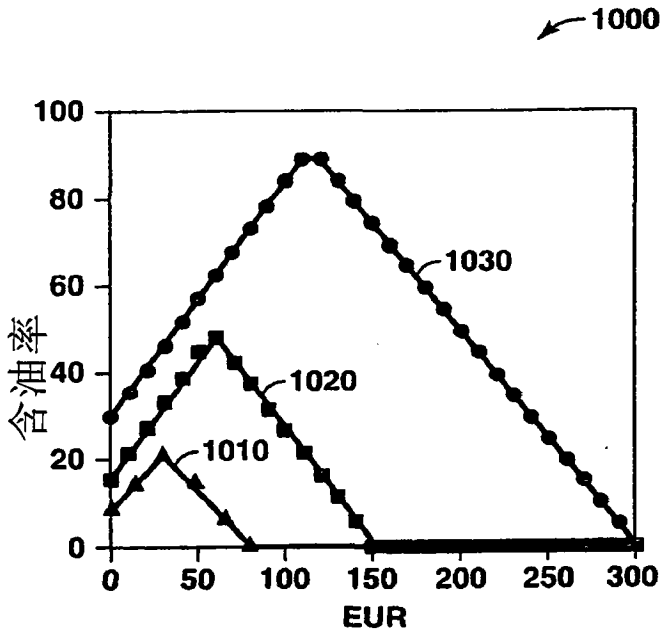

1000
100
80
60
40
20
0
含油率
1030
1020
1010
0
50
100
150
200
250
300
EUR

图 10

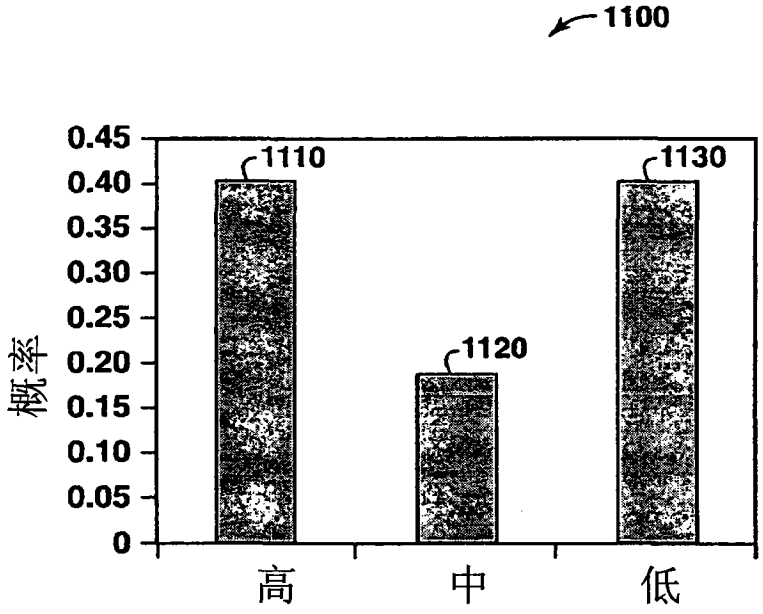

1100
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0
概率
1110
1120
1130
高
中
低

图 11

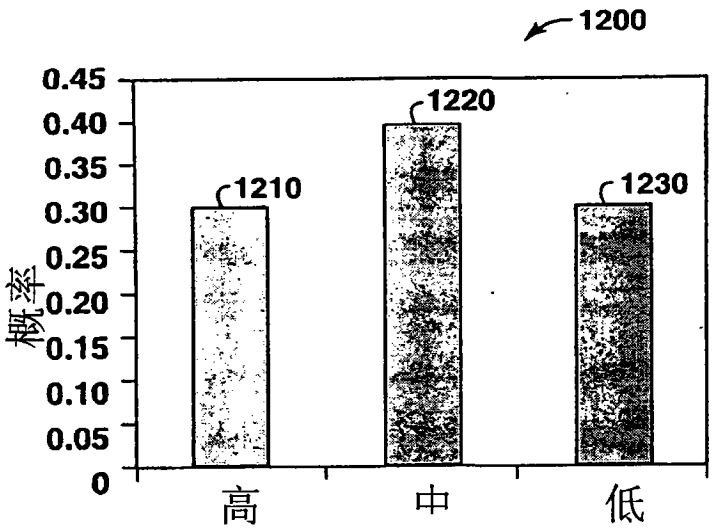

1200
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0
概率
1210
1220
1230
高
中
低

图 12

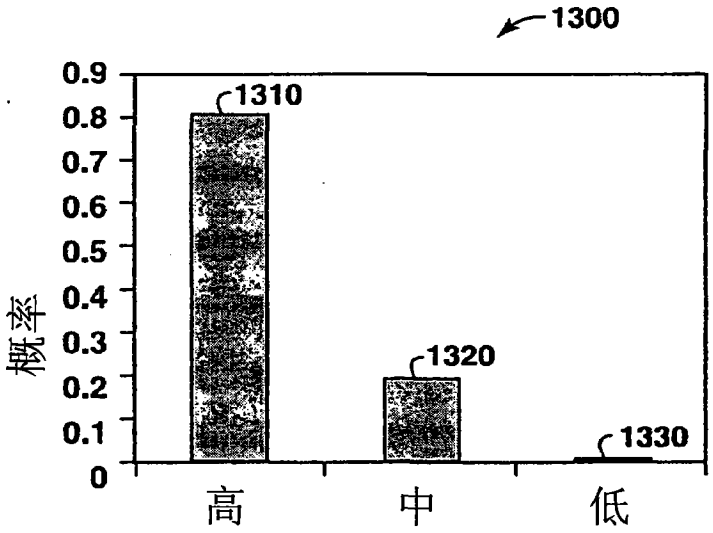

1300
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
概率
1310
1320
1330
高
中
低

图 13

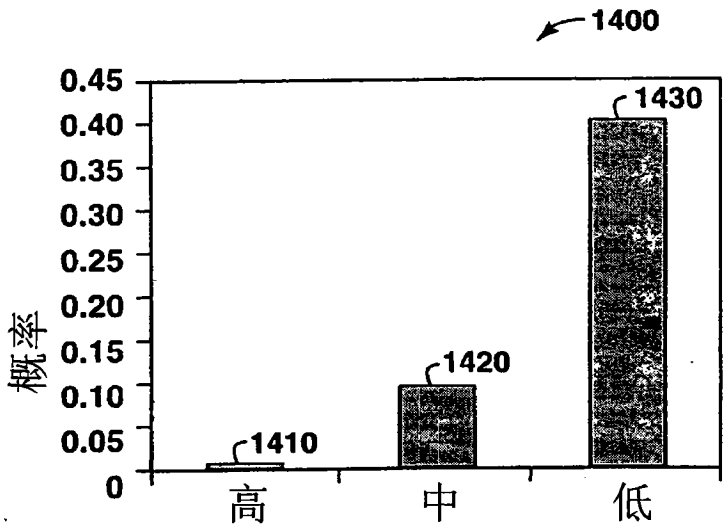


图 14