(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 111353211 B
(45)授权公告日 2025.05.30

(21)申请号 201911334907.0

(22)申请日 2019.12.23

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111353211 A

(43)申请公布日 2020.06.30

(30)优先权数据
18306834.5 2018.12.21 EP

(73)专利权人 达索系统公司
地址 法国韦利济—维拉库布莱

(72)发明人 G·库尼亚 E·赫尔曼 C·伍玉

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司 72002
专利代理师 刘瑜

(51)Int.Cl.
G06F 30/20(2020.01)
G06F 30/17(2020.01)

(56)对比文件
Michel Bergmann、Andrea Ferrero、Angelo Iollo et al.A zonal Galerkin-free POD model for incompressible flows.Journal of Computational Physics.2017,(第10期),第302-324页.

审查员 查晶晶

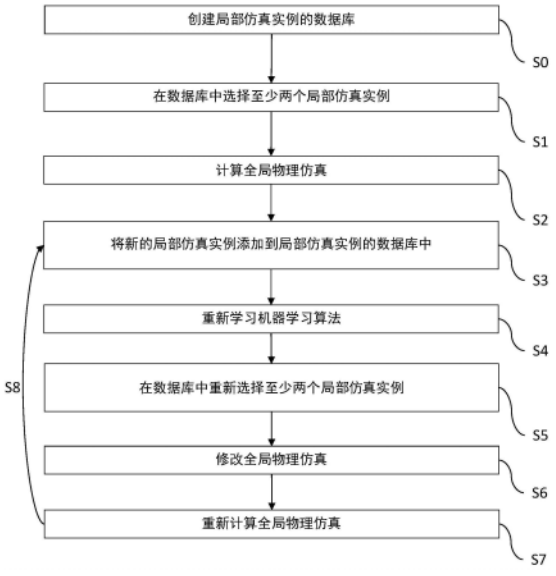
权利要求书3页 说明书20页 附图13页

(54)发明名称

用于大型环境的多实例化仿真

(57)摘要

本发明尤其涉及一种用于对包括在全局物理仿真中的多个物理仿真实例一起仿真的计算机实现的方法。该方法包括创建局部仿真实例的数据库。创建(S0)包括提供局部仿真的集合。创建还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,计算局部仿真的相应的缩减模型。创建还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,将相应的局部仿真实例存储在数据库中。相应的局部仿真实例包括相应的计算出的缩减模型。该方法还包括在局部仿真实例的数据库中选择至少两个局部仿真实例。该方法还包括计算全局物理仿真。对全局物理仿真的计算包括重用包括在所选择的至少两个局部仿真实例中的每个局部仿真实例中的每个相应的计算出的缩减模型。



CN 111353211 B

1.一种用于对包括在全局物理仿真中的多个物理仿真实例一起仿真的计算机实现的方法,所述方法包括:

-创建(S0)局部仿真实例的数据库,所述创建(S0)包括:

●提供(S10)局部仿真的集合,其中:

■所述局部仿真的集合包括至少两个局部仿真;

■局部仿真是这样的物理仿真:其为所述全局物理仿真的一部分并且能够单独地且独立于所述全局物理仿真被计算,其中,所述全局物理仿真与全局域相关联,并且每个局部仿真与相应的局部域相关联,所述相应的局部域包括相应的物理对象;并且

■所述局部仿真的集合中的每个局部仿真已经被计算;

●针对所述局部仿真的集合中的每个局部仿真,计算(S30)所述局部仿真的相应的缩减模型;以及

●针对所述局部仿真的集合中的每个局部仿真,将相应的局部仿真实例存储(S50)在所述数据库中,所述相应的局部仿真实例包括相应的计算出的缩减模型;

-在局部仿真实例的所述数据库中选择(S1)至少两个局部仿真实例;以及

-计算(S2)所述全局物理仿真,对所述全局物理仿真的所述计算(S2)包括重用(S220)包括在所选择的至少两个局部仿真实例中的每个局部仿真实例中的每个相应的计算出的缩减模型,

其中,所述方法还包括:

-在对每个局部仿真的每个相应的缩减模型的所述计算(S30)之前:

选择(S20)所述局部仿真的相应的感兴趣区,所述相应的感兴趣区是所述相应的局部域的非空子域;

-在对每个局部仿真的每个相应的缩减模型的所述计算(S30)处:

每个相应的缩减模型在所述相应的感兴趣区的边界处被计算;

-在对所述全局物理仿真的所述计算(S2)处:

将所选择的至少两个仿真实例的每个局部仿真的所述相应的感兴趣区放置(S210)在所述全局域中;并且

仅所述全局域的其余部分被计算,所述其余部分是所述全局域中被非感兴趣区占用的部分,所述全局域包括分别由所选择的至少两个局部仿真实例的每个局部仿真的每个相应的感兴趣区占用的区域,

其中,所述方法还包括针对所述局部仿真的集合中的每个局部仿真,在对所述相应的缩减模型的所述计算(S30)之后:

-定义(S40)探针,所述探针是所述局部仿真的相应的局部域的点,所述点与所述相应的感兴趣区相邻,每个探针包括所述局部仿真的仿真数据;

其中,包括所述相应的计算出的缩减模型的所存储的局部仿真实例还包括所述探针和所述相应的感兴趣区,

其中:

-在对所述全局物理仿真的所述计算(S2)期间,至少两个所选择的局部仿真实例中的至少两个局部仿真实例交互,所述交互导致所述至少两个仿真实例中的至少一个局部仿真实例的探针被富集(S221);并且

-由于富集(S221)探针,包括在其探针被富集的局部仿真实例中的所述相应的计算出的缩减模型被校正(S225),

其中:

-所述全局物理仿真是对给定风况下的风电场的运转的仿真,所述风电场包括风力涡轮机,所述全局域是对所述给定风况下的所述风电场进行建模的三维体积;

-每个局部仿真是对所述给定风况下的所述风力涡轮机中的相应的一个风力涡轮机的运转的仿真,对应于所述局部仿真的局部仿真实例形成表示对所述给定风况下的所述风力涡轮机中的相应的一个风力涡轮机的运转的仿真的数据、并且包括对所述给定风况下的所述风力涡轮机中的相应的一个风力涡轮机的运转的仿真的计算出的缩减模型,与所述局部仿真相关联的局部域是包括在所述全局域中的三维体积,其包含所述风力涡轮机中的相应的一个风力涡轮机并且对所述风力涡轮机中的相应的一个风力涡轮机和围绕所述风力涡轮机中的相应的一个风力涡轮机的空气进行建模;并且

-至少两个局部仿真实例之间的交互对由于附近正在工作的另一风力涡轮机而引起的对风力涡轮机周围的风的扰动进行仿真。

2.根据权利要求1所述的方法,还包括在对所选择的至少两个局部仿真实例的每个局部仿真的所述相应的感兴趣区的所述放置(S210)处,使所述相应的感兴趣区的边界与所述全局域中由所述相应的感兴趣区占用的所述区域的边界接合。

3.根据权利要求1所述的方法,还包括针对其探针被富集的每个局部仿真实例:

-在对所述相应的计算出的缩减模型的所述校正(S225)之前,计算(S222)所有经富集的探针的集合与对应探针在其被富集之前的集合之间的差异;

-确定(S223)所述差异是否超过预定的阈值;以及

-如果确定所述差异超过所述预定的阈值,则校正(S225)所述相应的计算出的缩减模型。

4.根据权利要求3所述的方法,其中,所述方法还包括:

-在对局部仿真实例的所述数据库的所述创建(S0)处,在存储在所述数据库中的所述局部仿真实例上学习(S60)机器学习算法,所述机器学习算法针对所述数据库中的每个局部仿真实例,提供存储在所述局部仿真实例中的所述探针与存储在所述局部仿真实例中的所述相应的计算出的缩减模型之间的相应的关系;以及

-针对其探针被富集的每个局部仿真实例,校正(S225)包括在所述局部仿真实例中的所述相应的计算出的缩减模型包括应用(S224)所述机器学习算法,所述校正(S225)是基于所述相应的关系来执行的。

5.根据权利要求1所述的方法,其中,在由于对探针的所述富集(S221)而对相应的缩减模型的每次校正(S225)处,仿真实例被存储在所述数据库中,所述仿真实例包括经校正的缩减模型和所述经富集的探针。

6.根据权利要求4所述的方法,还包括在对所述全局物理仿真的所述计算(S2)之后:

-将新的局部仿真实例添加(S3)到局部仿真实例的所述数据库中,对所述新的局部仿真实例的所述添加(S3)包括:

●提供新的局部仿真,所述新的局部仿真已经被计算,所述新的局部仿真与相应的局部域相关联;

●选择所述新的局部仿真的相应的感兴趣区,所述相应的感兴趣区是所述相应的局部域的非空子域;

●在所述相应的感兴趣区的边界处计算所述新的局部仿真的相应的缩减模型;

●定义探针,所述探针是所述相应的局部域的点,所述点与所述相应的感兴趣区相邻,每个探针包括所述新的局部仿真的仿真数据;以及

●将新的局部仿真实例存储在所述数据库中,所述新的局部仿真实例包括所述新的局部仿真的相应的缩减模型、所述新的局部仿真的探针以及所述新的局部仿真的相应的感兴趣区;

所述添加(S3)导致所述新的仿真实例是局部仿真实例的所述数据库中的局部仿真实例中的一个,

所述方法还包括:

-在对所述新的局部仿真实例的所述添加(S3)之后,在仿真实例的所述数据库上重新学习(S4)所述机器学习算法;

-在局部仿真实例的所述数据库中重新选择(S5)至少两个局部仿真实例,所重新选择的至少两个局部仿真实例包括所述新的局部仿真实例;以及

-利用所重新选择的至少两个局部仿真实例来重新计算(S7)所述全局物理仿真。

7.根据权利要求6所述的方法,还包括在所述重新学习(S4)之后并且在所述重新计算(S7)之前,修改(S6)所述全局物理仿真。

8.根据权利要求6所述的方法,其中,所述添加(S3)和所述重新计算(S7)被迭代(S8)。

9.根据权利要求1所述的方法,其中:

-所述局部仿真对与所述相应的物理对象相关联的相应的物理行为进行仿真;

-所述全局物理仿真对所有相应的物理对象的集合的物理行为进行仿真。

10.根据权利要求1所述的方法,其中,所有局部仿真都是给定的局部仿真的扰动,所述给定的局部仿真是所述局部仿真的集合的一部分。

11.一种计算机程序产品,包括用于执行根据权利要求1至10中任一项所述的方法的指令。

12.一种系统,包括耦合到存储器和显示器的处理器,所述存储器上记录有用于执行根据权利要求1至10中任一项所述的方法的指令。

用于大型环境的多实例化仿真

技术领域

[0001] 本发明涉及工程和物理仿真领域。

背景技术

[0002] 如今,可再生和可持续技术的发展被高度重视,仅举几例来说,例如应对环境规则的可再生能源、清洁智慧城市的发展、交通运输的观念。

[0003] 为了使可持续解决方案的发展可行,以发展可再生和可持续技术,人们普遍认为必须使用数值仿真工具。实际上,对考虑大规模存在的不确定条件(风速、建筑物分布、飞机旅行期间的天气状况等)的需要以及给定场景的不同因素(不同的建筑物、飞机的不同的风力涡轮机、飞机的不同零件等)之间的相互作用影响,使得在设计阶段使用实验是不可行的。

[0004] 同时,一种评估设计的既定方法是经由专用软件使用数值方法。但是,在早期设计阶段设置数值仿真非常耗时,特别是当新设计将被提交至的环境(环境也称为场景,其中场景是在其中执行仿真的3D空间)反复变化时。这主要是由于以下事实:对于每次环境变化,都必须对场景进行相应的调整,即,需要重新划分网格、重新应用边界条件并重新计算整个结果(请参见Marijn P.Zwier,Wessel W.Wits的“Physics in Design:Real-time Numerical Simulation Integrated into the CAD Environment”.Procedia CIRP,Volume 60,2017,Pages 98-103,ISSN 2212-8271,https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.054)。同样,在大型域(即,大型场景环境)的情况下,与仿真手段(仿真时间、数据存储等)相关联的成本呈指数增长(请参见J.Blazek的“Computational Fluid Dynamics:Principles and Applications”.ISBN:978-0-08-044506-9.Elservier Science,2005,2nd Edition)。

[0005] 对于大规模仿真(例如,流体流动仿真、结构力学仿真、等离子动力学仿真),可以使用多实例化的物理仿真、或需要使用在虚拟世界中仿真的物理模型(例如,电子游戏或动画电影)的任何领域的仿真,需要针对整个域运行仿真工具。当面临需要一起计算大规模仿真的场景中所包括的几个仿真时,只有运行所有仿真的整个集合的解决方案是已知的。这样的解决方案不适用于需要大量改变场景布置的大规模仿真的实例化。

[0006] 在该上下文中,仍然需要改进的方法,以用于对包括在物理仿真中的多个物理仿真实例一起仿真。

发明内容

[0007] 因此,提供了一种计算机实现的方法,以用于对包括在全局物理仿真中的多个物理仿真实例一起仿真。该方法包括创建局部仿真实例的数据库。创建(S0)包括提供局部仿真的集合。局部仿真的集合包括至少两个局部仿真。局部仿真是这样的物理仿真:其为全局物理仿真的一部分并且能够单独地且独立于多物理仿真被计算。局部仿真的集合中的每个局部仿真已经被计算。创建还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,计算该局部仿

真的相应的缩减模型。创建还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真，将相应的局部仿真实例存储在数据库中。相应的局部仿真实例包括相应的计算出的缩减模型。该方法还包括在局部仿真实例的数据库中选择至少两个局部仿真实例。该方法还包括计算全局物理仿真。对全局物理仿真的计算包括重用包括在所选择的至少两个局部仿真实例中的每个局部仿真实例中的每个相应的计算出的缩减模型。

[0008] 这构成了用于对包括在物理仿真中的多个物理仿真实例一起仿真的改进方法。

[0009] 该方法可以包括以下中的一项或多项：

[0010] -全局物理仿真与全局域相关联，并且每个局部仿真与相应的局部域相关联，并且该方法还包括：

[0011] ●在对每个局部仿真的每个相应的缩减模型的计算之前：

[0012] ■选择局部仿真的相应的感兴趣区，相应的感兴趣区是相应的局部域的非空子域；

[0013] ●在对每个局部仿真的每个相应的缩减模型的计算处：

[0014] ■每个相应的缩减模型在相应的感兴趣区的边界处被计算；

[0015] ●在对全局物理仿真的计算处：

[0016] ■将所选择的至少两个仿真实例的每个局部仿真的相应的感兴趣区放置在全局域中；并且

[0017] ■仅全局域的其余部分被计算，其余部分是全局域中被非感兴趣区占用的部分，全局域包括分别由所选择的至少两个局部仿真实例的每个局部仿真的每个相应的感兴趣区占用的区域；

[0018] -该方法还包括在对所选择的至少两个局部仿真实例的每个局部仿真的相应的感兴趣区的放置处，使相应的感兴趣区的边界与全局域中由相应的感兴趣区占用的区域的边界接合；

[0019] -该方法还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真，在对相应的缩减模型的计算之后：

[0020] ●定义探针，探针是局部仿真的相应的局部域的点，这些点与相应的感兴趣区相邻，每个探针包括局部仿真的仿真数据，其中包括相应的计算出的缩减模型的所存储的局部仿真实例还包括探针和相应的感兴趣区；

[0021] -在对全局物理仿真的计算期间，至少两个所选择的局部仿真实例中的至少两个局部仿真实例交互，该交互导致至少两个仿真实例中的至少一个局部仿真实例的探针被富集，并且由于富集探针，包括在其探针被富集的局部仿真实例中的相应的计算出的缩减模型被校正；

[0022] -该方法还包括针对其探针被富集的每个局部仿真实例：

[0023] ●在对相应的计算出的缩减模型的校正之前，计算所有经富集的探针的集合与对应探针在其被富集之前的集合之间的差异；

[0024] ●确定差异是否超过预定的阈值；以及

[0025] ●如果确定差异超过预定的阈值，则校正相应的计算出的缩减模型；

[0026] -该方法还包括：

[0027] ●在对局部仿真实例的数据库的创建处，在存储在数据库中的局部仿真实例上学

习机器学习算法,该机器学习算法针对数据库中的每个局部仿真实例,提供存储在局部仿真实例中的探针与存储在局部仿真实例中的相应的计算出的缩减模型之间的相应的关系;以及

[0028] ●针对其探针被富集的每个局部仿真实例,校正包括在局部仿真实例中的相应的计算出的缩减模型包括应用机器学习算法,该校正是基于相应的关系来执行的;

[0029] -在由于对探针的富集而对相应的缩减模型的每次校正处,仿真实例被存储在数据库中,该仿真实例包括经校正的缩减模型和经富集的探针;

[0030] -该方法还包括在对全局物理仿真的计算之后:

[0031] ●将新的局部仿真实例添加到局部仿真实例的数据库中,对新的局部仿真实例的添加包括:

[0032] ■提供新的局部仿真,该新的局部仿真已经被计算,该新的局部仿真与相应的局部域相关联;

[0033] ■选择新的局部仿真的相应的感兴趣区,该相应的感兴趣区是相应的局部域的非空子域;

[0034] ■在相应的感兴趣区的边界处计算新的局部仿真的相应的缩减模型;

[0035] ■定义探针,探针是相应的局部域的点,这些点与相应的感兴趣区相邻,每个探针包括新的局部仿真的仿真数据;以及

[0036] ■将新的局部仿真实例存储在数据库中,该新的局部仿真实例包括新的局部仿真的相应的缩减模型、新的局部仿真的探针和新的局部仿真的相应的感兴趣区,

[0037] 该添加导致新的仿真实例是局部仿真实例的数据库中的局部仿真实例中的一个,该方法还包括:

[0038] ●在对新的局部仿真实例的添加之后,在仿真实例的数据库上重新学习机器学习算法;

[0039] ●在局部仿真实例的数据库中重新选择至少两个局部仿真实例,所重新选择的至少两个局部仿真实例包括新的局部仿真实例;以及

[0040] ●利用所重新选择的至少两个局部仿真实例来重新计算全局物理仿真;

[0041] -该方法还包括在重新学习之后并且在重新计算之前,修改全局物理仿真;

[0042] -添加和重新计算被迭代;

[0043] -每个局部仿真的每个相应的局部域包括相应的物理对象,局部仿真对与相应的物理对象相关联的相应的物理行为进行仿真;并且全局物理仿真对所有相应的物理对象的集合的物理行为进行仿真;和/或

[0044] -所有局部仿真都是给定的局部仿真的扰动,给定的局部仿真是局部仿真的集合的一部分。

[0045] 还提供了一种计算机程序,其包括用于执行该方法的指令。

[0046] 还提供了一种其上记录有计算机程序的计算机可读存储介质。

[0047] 还提供了一种计算机,该计算机包括耦合到存储器和显示器的处理器,该存储器上记录有计算机程序。

附图说明

[0048] 现在将通过非限制性示例的方式并参考附图来描述本发明的示例,其中:

[0049] -图1示出了该方法的示例的流程图;

[0050] -图2示出了根据该方法创建局部仿真实例的数据库的示例的流程图;

[0051] -图3示出了根据该方法计算全局物理仿真的示例的流程图;

[0052] -图4示出了根据该方法重用每个相应的计算出的缩减模型的示例的流程图;

[0053] -图5示出了本发明的计算机的示例;

[0054] -图6示出了根据现有技术的方法对多个物理仿真实例一起仿真的示例;

[0055] -图7示出了根据该方法对多个物理仿真实例一起仿真的示例;

[0056] -图8-9示出了两个屏幕截图,其示出了选择相应的感兴趣区的示例;

[0057] -图10示出了说明定义探针的示例的屏幕截图;

[0058] -图11示出了说明放置相应的感兴趣区的示例的屏幕截图;

[0059] -图12示出了说明放置相应的感兴趣区的示例的屏幕截图;

[0060] -图13示出了计算缩减模型的示例的图;

[0061] -图14示出了基元素的示例;以及

[0062] -图15示出了接合的实现方式。

具体实施方式

[0063] 参照图1的流程图,提供了一种计算机实现的方法,以用于对包括在全局物理仿真中的多个物理仿真实例一起仿真。该方法包括创建S0局部仿真实例的数据库。创建S0包括提供S10局部仿真的集合。局部仿真的集合包括至少两个局部仿真。局部仿真是这样的物理仿真:其为全局物理仿真的一部分,并且可以单独且独立于全局物理仿真进行计算。局部仿真的集合中的每个局部仿真已经被计算。创建S0还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,计算S30局部仿真的相应缩减模型。创建S0还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,将相应的局部仿真实例存储S50在数据库中,相应的局部仿真实例包括相应的计算出的缩减模型。该方法还包括在局部仿真实例的数据库中选择S1至少两个局部仿真实例。该方法还包括计算S2全局物理仿真。全局物理仿真的计算S2包括重用S220包括在所选择的至少两个局部仿真实例中的每个局部仿真实例中的每个相应的计算出的缩减模型。

[0064] 这种方法改进了对包括在全局物理仿真中的多个物理仿真实例的一起仿真。首先,全局物理仿真的局部部分(即,计算出的缩减模型被重用的局部仿真)已经被计算。因此,在计算全局物理仿真时,该方法不会重新计算已经计算的局部部分。换言之,该方法允许计算物理仿真,同时对该物理仿真的局部部分一起仿真,这相对快速,并且节约使用计算机资源。其次,在计算全局物理仿真时,仅重用全局物理仿真的已经计算的局部部分的缩减模型。仿真的缩减模型比仿真本身要求更少的存储和计算资源,但仍然捕捉到该仿真的物理性质。这样,重用的每个缩减模型基本上等同于对应的局部仿真的仿真结果。这意味着该方法不仅以更快、更经济的方式计算包括局部部分的物理仿真,而且同时保证一定的物理精确度。此外,在示例中,每个局部仿真的时间尺度与全局物理仿真的时间尺度不同。这些多尺度问题可能使全局物理仿真的计算在时间和/或计算资源方面变得复杂和/或昂贵,因为不同的物理模型可能会在不同的时间尺度上演变,所有这些都需要考虑。通过不重新计

算局部仿真,根据本发明对全局物理仿真的计算S2可以仅考虑全局物理仿真的时间尺度,而不考虑局部仿真的时间尺度,从而减少甚至避免了这些多尺度问题。

[0065] 在包括以上内容和以下内容的所有本说明书中,至少一个表示一个或多个,并且至少两个表示两个或更多个。

[0066] 该方法是计算机实现的。这表示该方法的步骤(或基本上所有步骤)由至少一个计算机或任何相似的系统来执行。因此,该方法的步骤由计算机可能全自动或半自动地执行。在示例中,可以通过用户-计算机交互来执行该方法的步骤中的至少一些步骤的触发。所要求的用户-计算机交互水平可能取决于预见的自动化水平,并且与实现用户意愿的需求保持平衡。在示例中,该水平可以是用户定义的和/或预定义的。

[0067] 方法的计算机实现方式的典型示例是利用适用于该目的的系统(例如,计算机系统)来执行该方法。该系统可以包括耦合到存储器和图形用户接口(GUI)的处理器,存储器上记录有计算机程序,计算机程序包括用于执行该方法的指令。存储器还可以存储数据库。存储器是适用于这种存储的任何硬件,可能包括若干物理不同的部分(例如,一部分用于程序,并且可能一部分用于数据库)。

[0068] 图5示出了系统的示例,其中该系统是诸如用户的工作站之类的客户端计算机系统。

[0069] 示例的客户端计算机包括连接到内部通信总线1000的中央处理单元(CPU)1010,和同样连接到总线的随机存取存储器(RAM)1070。客户端计算机进一步设置有图形处理单元(GPU)1110,图形处理单元(GPU)1110与连接到总线的视频随机存取存储器1100相关联。在本领域中视频RAM 1100也被称为帧缓冲器。大容量存储设备控制器1020管理对诸如硬盘驱动器1030之类的大容量存储器设备的访问。适于有形地体现计算机程序指令和数据的大容量存储器设备包括所有形式的非易失性存储器,举例来说包括诸如EPROM、EEPROM以及闪速存储器设备之类的半导体存储器设备;诸如内部硬盘和可移除盘之类的磁盘;磁光盘;以及CD-ROM盘1040。前述中的任一项可以由专门设计的ASIC(专用集成电路)进行补充或并入其中。网络适配器1050管理对网络1060的访问。客户端计算机还可以包括触觉设备1090,例如,光标控制设备、键盘等。在客户端计算机中光标控制设备用于允许用户选择性地将光标定位在显示器1080上的任何期望的位置。另外,光标控制设备允许用户选择各种命令并输入控制信号。光标控制设备包括用于向系统输入控制信号的多个信号生成设备。典型地,光标控制设备可以是鼠标,鼠标的按键用于生成信号。可替代地或另外地,客户端计算机系统可以包括触敏板和/或触敏屏。

[0070] 计算机程序可以包括可由计算机执行的指令,该指令包括用于使得上述系统执行该方法的单元。程序可以记录在包括系统的存储器的任何数据存储介质上。例如,可以以数字电子电路,或者以计算机硬件、固件、软件或以其组合来实现程序。程序可以被实现为装置(例如,有形地体现在机器可读存储设备中的产品),以用于由可编程处理器执行。方法步骤可以由执行指令程序的可编程处理器来执行,以通过对输入数据进行操作并生成输出来执行该方法的功能。因此,处理器可以是可编程的,并且耦合以从数据存储系统、至少一个输入设备以及至少一个输出设备接收数据和指令,并向其发送数据和指令。可以以高级过程编程语言或面向对象的编程语言来实现应用程序,或者如果需要则以汇编语言或机器语言来实现应用程序。在任何情况下,语言都可以是编译语言或解释语言。程序可以是完全安

装程序或更新程序。在任何情况下将程序应用于系统都会产生用于执行该方法的指令。

[0071] 该系统可以是CAD系统、CAE系统、CAM系统、PDM系统和/或PLM系统的任何组合。在这些不同的系统中,建模对象由对应的数据定义。建模对象是由例如存储在数据库中的数据定义的任何对象。引申开来,表述“建模对象”指定数据本身。根据系统的类型,建模对象可以由不同种类的数据定义。因此,可以称为CAD对象、PLM对象、PDM对象、CAE对象、CAM对象、CAD数据、PLM数据、PDM数据、CAM数据、CAE数据。但是,这些系统并不是彼此排斥的,因为建模对象可以由与这些系统的任何组合相对应的数据定义。系统因此很可能同时是CAD和PLM系统,如从下面提供的这种系统的定义将显而易见的。

[0072] CAD系统另外表示至少适用于在建模对象的图形表示的基础上来设计建模对象的任何系统,例如,CATIA。在这种情况下,定义建模对象的数据包括允许建模对象的表示的数据。例如,CAD系统可以使用边或线(在某些情况下使用表面或面)来提供CAD建模对象的表示。可以以诸如非均匀有理B样条(NURBS)的各种方式来表示线、边、或面。特别地,CAD文件包含规格,根据规格可以生成几何结构,这进而允许生成表示。建模对象的规格可以存储在单个CAD文件或多个CAD文件中。表示CAD系统中的建模对象的文件的典型大小在每个零件一兆字节的范围内。并且建模对象典型地可以是成千上万个零件构成的组装件。

[0073] PLM系统另外表示适用于对表示物理制造的产品(或要制造的产品)的建模对象进行管理的任何系统。因此,在PLM系统中,由适于制造物理对象的数据来定义建模对象。这些数据典型地可以是尺寸值和/或容差值。为了正确制造对象,实际上最好具有这样的值。

[0074] CAM解决方案另外表示适用于对产品的制造数据进行管理的任何解决方案、软件或硬件。制造数据一般包括与要制造的产品、制造过程以及所要求的资源有关的数据。CAM解决方案用于计划和优化产品的整个制造过程。例如,CAM解决方案能够给CAM用户提供关于可行性、制造过程的持续时间或者可以用于制造过程的特定步骤的资源(例如,特定的机器人)的数量的信息;并且因此允许做出关于管理或所要求的投资的决策。CAM是CAD过程和潜在的CAE过程之后的后续过程。这样的CAM解决方案由Dassault Systèmes以商标DELMIA®提供。

[0075] CAE解决方案另外表示适用于对建模对象的物理行为进行分析的任何解决方案、软件或硬件。公知且广泛使用的CAE技术是有限元方法(FEM),其典型地涉及将建模对象划分为能够通过方程对物理行为进行计算和仿真的元素。这样的CAE解决方案由Dassault Systèmes以商标SIMULIA®提供。另一种发展中的CAE技术涉及对由来自不具有CAD几何数据的不同物理领域的多个组件所构成的复杂系统进行建模和分析。CAE解决方案允许进行仿真并且因此对要制造的产品进行优化、改进以及验证。这样的CAE解决方案由Dassault Systèmes以商标DYMOLA®提供。

[0076] PDM代表产品数据管理。PDM解决方案表示适用于对与特定产品有关的所有类型的数据进行管理的任何解决方案、软件或硬件。PDM解决方案可以由产品生命周期中所涉及的所有参与者使用:主要是工程师,但是也包括项目经理、财政人员、销售人员以及买方。PDM解决方案一般基于面向产品的数据库。PDM解决方案允许参与者共享关于其产品的一致性数据,并且因此防止参与者使用分歧性数据。这样的PDM解决方案由Dassault Systèmes以商标ENOVIA®提供。

[0077] 该方法用于对包括在全局物理仿真中的多个物理仿真实例一起仿真。

[0078] 物理仿真是来自一个或多个物理领域的任何仿真,所述物理领域例如电子、电力、力学、机电、流体力学、重力力学、统计力学、波物理学、统计物理学、粒子系统、液压系统、量子物理学、地球物理学、天体物理学、化学、航空航天、地磁、电磁学、等离子体物理学或计算流体动力学(CFD)。物理仿真也可以是多物理仿真,即,涉及多个物理领域的仿真。它可以是来自包括上述示例清单的一个或多个物理领域的任何物理或多物理系统的在时间上对至少一种行为的仿真。

[0079] “全局”表示物理仿真包括至少一个局部部分,以下称为局部仿真,该局部仿真是这样的物理仿真:其为构成全局物理仿真的一部分,但是可以单独并且独立于全局物理仿真进行计算。可以理解,全局仿真可以是多物理仿真,其中每个局部部分是来自相应的物理领域的物理仿真。可以理解,任何局部仿真也可以是多物理仿真。应当理解,全局仿真的计算涉及局部仿真的计算和进一步的计算。进一步的计算取决于局部仿真的计算,并且局部仿真的计算不足以执行全局计算的计算。

[0080] 物理或多物理系统是其行为(例如,在时间上)可以经由来自至少一个物理领域(例如上述物理领域的示例之一)的至少一个物理模型进行仿真的任何现实世界系统或物理实体。现实世界系统或物理实体可以是现实世界的对象、电子产品、电气产品、机械产品、化学产品、机电产品、粒子系统或电磁产品。物理模型可以是电子模型、电气模型、机械模型、统计模型、粒子模型、液压模型、量子模型、地质模型、天文模型、化学模型、电磁模型或流体模型。物理模型可以是一个或多个方程的方程组,例如,一个或多个微分方程和/或偏微分方程和/或代数方程。多物理系统通常具有子系统,子系统本身是物理或多物理系统并且子系统通过例如由物理定律给出的物理关系或逻辑关系完全连接。因此,多物理系统是用于表示包括子系统的现实世界系统或任何的物理实体,这些子系统通过物理或逻辑关系(例如,机械关系(例如,对应于传递力或运动的连接)、电气关系(例如,对应于例如电路中的电连接)、液压关系(例如,对应于传输通量的传导体)、逻辑关系(例如,对应于信息流)、流体关系(例如,对应于流体流动)、化学关系和/或电磁关系)联系在一起。该系统被称为“多物理的”,因为多物理系统的物理或逻辑关系可以属于多个物理领域(尽管并非必须如此)。

[0081] 物理或多物理系统可以对应于在完成其虚拟设计之后在现实世界中要制造的工业产品,例如(例如,机械的)零件或零件的组装件,或更一般地,任何刚性体组装件(例如,移动机构)、刚性体机构。CAD和/或CAE软件解决方案允许设计各种和无限制的工业领域中的产品,包括:航空航天、建筑、建造、消费品、高科技设备、工业设备、运输、海运和/或海上或运输。因此,物理或多物理系统可以表示这样的工业产品:该工业产品可以是陆地车辆(包括例如汽车和轻型卡车设备、赛车、摩托车、卡车和机动车设备、卡车和公共汽车、火车)的一部分(或全部)、航空器(包括例如机身设备、航空航天设备、推进设备、国防产品、航空设备、航天设备)的一部分(或全部)、海军载具(包括例如海军设备、商业船、海上设备、游艇和工作船、船舶设备)的一部分(或全部)、机械零件(包括例如工业制造机械、重型移动机械或设备、安装设备、工业设备产品、制造的金属产品、轮胎制造产品)、机电或电子零件(包括例如消费电子产品、安全和/或控制和/或仪表产品、计算和通信设备、半导体、医疗设备和装备)、消费品(包括例如家具、家庭和花园产品、休闲用品、时尚产品、硬商品零售商的产

品、软商品零售商的产品)、包装(包括例如食品和饮料和烟草、美容和个人护理、家用产品包装)。全局物理仿真可以是在现实世界中要制造的至少一种工业产品的行为的仿真,已经对该工业产品进行了设计。该仿真可以在至少一种工业产品的设计之后仿真该至少一种工业产品的至少一种行为(例如,在时间上的演变)。在此方法之后,在通过该方法对至少一种工业产品进行仿真之后,可以在现实世界中制造该至少一种工业产品。

[0082] 仿真由至少一个物理模型建模的物理或多物理系统通常包括:通过计算至少一个物理模型来计算该系统在时间上的物理行为的近似值(例如,在时间上的演变),和/或存储结果和/或显示结果。在计算至少一个物理模型之前,可以提供至少一个栅格(或网格)和/或至少一个时间步长和/或至少一个仿真参数。该提供可以根据用户动作来执行。该计算通常(但不总是)包括根据至少一个栅格和/或至少一个时间步长对至少一个物理模型的一个或多个方程进行离散化。可以通过使用任何已知的数值方法来进行离散化。

[0083] 全局或局部仿真包括仿真状态(为简单起见,在下文中可以称为"状态")。状态是在给定时间对物理系统的物理状态的表示,该物理系统在时间上的行为通过该仿真进行仿真。例如,物理状态可以是给定时间的任何物理量。物理量(也称为物理的量)是可以通过测量进行量化的现象、物体或物质的物理性质。物理量可以是但不限于:长度、质量、时间、电流、温度、物质的量、发光强度、吸收率、吸收剂量率、加速度、角加速度、角动量、角速率(或角速率)、面积、面积密度、电容、催化活性、催化活性浓度、化学势、裂纹、电流密度、当量剂量、动态粘度、电荷、电荷密度、电位移、电场强度、电导率、电传导性、电位、电阻、电阻率、能量、能量密度、熵、力、频率、燃料效率、半衰期、热量、热容、热通量密度、照度、阻抗、脉冲、电感、辐照度、强度、急动度、痉挛度(或瞬动)、运动粘度、线密度、光通量(或光功率)、马赫数(或马赫)、磁场强度、磁通量、磁通量密度、磁化强度、质量分数、(质量)密度(或体积密度)、平均寿命、摩尔浓度、摩尔能量、摩尔熵、摩尔热容、惯性矩、动量、磁导率、介电常数、平面角、功率、压力、爆裂声、(放射性)活度、(放射性)剂量、辐射率、辐射强度、反应速率、折射率、磁阻、立体角、速度、比能量、比热容、比容、自旋、应变、应力、表面张力、温度梯度、导热率、扭矩、速度、体积、体积流量、波长、波数、波矢、重量、功、杨氏模量。状态也可以是物理量的向量。仿真典型地包括初始时间和最终时间,并且在初始时间和最终时间之间包括至少一个时间步长。包括初始时间和最终时间在内,每个时间步长都有一个状态。

[0084] 计算仿真表示计算所有仿真结果,仿真结果是包含表示状态的信息的数据。因此,计算仿真表示基本上计算表示在所有时间的所有状态的所有信息。可以通过使用能够以不同时间步长导出和/或显示仿真结果的任何已知的数值方法和/或任何现有计算机程序来计算本发明的仿真。

[0085] 该方法包括创建S0局部仿真实例的数据库。

[0086] 创建S0包括提供S10局部仿真的集合。

[0087] 已经计算了局部仿真的集合中的每个局部仿真。在示例中,提供S10包括加载和/或访问(例如,在数据库中)已经计算的局部仿真的集合。因此,提供S10表示使得局部仿真的集合的数据可用于执行该方法的系统,例如,这些数据被加载到系统的存储器(例如,易失性存储器)中,或者可以由该系统从存储器(例如,非易失性存储器)取回。在示例中,在提供S10之前可以计算该集合中的每个局部仿真并且将计算的结果存储在数据库中。在所有情况下,在提供S10处,该集合的所有局部仿真都已经被计算,这表示所有局部仿真的所有

仿真结果都可用,例如可以用于运行和/或显示局部仿真和/或计算其相应的缩减模型。局部仿真的集合包括至少一个局部仿真。

[0088] 每个局部仿真是一种物理仿真,其是全局物理仿真的一部分,并且可以被单独并且独立于全局物理仿真进行计算。如已经说过的,局部仿真不足以执行全局计算的计算。

[0089] 当计算全局物理仿真要求使用在局部仿真的计算过程中获得的结果和/或从该结果导出的数据时,局部仿真是全局物理仿真的一部分。当计算局部仿真不要求使用在全局物理仿真的计算过程中获得的任何结果和/或从该结果导出的任何数据时,可以单独地且独立于全局物理仿真来计算局部仿真。换言之,每个局部仿真表示全局物理仿真的独立的子仿真(或局部部分)。在示例中,当通过也用于对全局物理仿真进行建模的至少一个物理模型对局部仿真进行建模时,局部仿真是全局物理仿真的一部分。在这些示例中,“单独地且独立地计算”是指可以对至少一个物理模型进行求解和/或离散化和/或近似和/或计算,而不对介入到该全局物理仿真的建模中的其他物理模型进行求解和/或离散化和/或近似。换言之,至少一个物理模型对于运行和/或计算局部仿真是自一致的和/或自足的。在这些示例中,可以存在至少一个其他物理模型,其介入到全局物理仿真的建模,并且将对所述至少一个物理模型的求解和/或离散化和/或近似的结果和/或从该结果导出的数据作为输入和/或参数。

[0090] 为了说明局部仿真和全局仿真的定义,现在给出非限制性示例。以包括风力涡轮机的风电场的仿真作为示例。全局物理仿真是在给定风况下风电场的整体行为。每个局部仿真单独对给定风况下一台风力涡轮机的行为进行仿真。计算风电场的整体行为的仿真要求计算场中每台风力涡轮机的行为的仿真。然而,可以在不对整个风电场进行仿真的情况下完成对一台风力涡轮机的一种行为的仿真进行计算。

[0091] 局部仿真实例的数据库的创建S0包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,计算(S30)局部仿真的相应的缩减模型。

[0092] 计算出的仿真的缩减模型是通过使用降阶建模技术从该仿真计算出的模型。降阶建模(ROM)是降低数学模型的维数和计算复杂度的技术。ROM(以下称为缩减模型)是由高保真度仿真(例如,计算出的全仿真)构建的,并且随后可以用于生成用于较低级计算的仿真。ROM方法的一个示例是Galerkin投影(例如,参见Rowley,Clarence W、Tim Colonius和Richard M.Murray的“Model reduction for compressible flows using POD and Galerkin projection.”Physica D:Nonlinear Phenomena 189.1-2(2004):115-129,以及Barone,Matthew F.等人的“Reduced order modeling of fluid/structure interaction.”Sandia National Laboratories Report,SAND No 7189(2009):44-72),该方法尤其普遍用于流体动力学。Galerkin投影方法使用本征正交分解(POD)来降低流动仿真的维数,然后在该降低的空间上找到动力学。在此基础上还有其他方法,例如,缩减基础方法和平衡截断(例如,参见Veroy,K和A.T.Patera的“Certified real-time solution of the parametrized steady incompressible Navier-Stokes equations:rigorous reduced-basis a posteriori error bounds.”International Journal for Numerical Methods in Fluids47.8-9(2005):773-788,以及Rowley,Clarence W的“Model reduction for fluids,using balanced proper orthogonal decomposition.”Modeling And Computations In Dynamical Systems:In Commemoration of the 100th Anniversary

of the Birth of John von Neumann.2006.301-317)。一般而言,ROM使用诸如POD或单值分解(SVD)之类的技术根据计算出的全仿真的状态来计算表示仿真的主要组件的基础。SVD提供了一种将矩阵分解为奇异向量和奇异值的方法。SVD允许发现与本征分解相同类型、并且例如可以表示力学系统的主要组件的信息中的一些。Francisco Chinesta、Antonio Huerta、Gianluigi Rozza和Karen Willcox的Encyclopedia of Computational Mechanics(由Erwin Stein、Renéde Borst和Thomas J.R.Hughes编辑,2004年)中还提到“模型降阶”。根据该方法的缩减模型的计算使用ROM的任何技术,例如上文参考文献中描述的技术。本发明的仿真的缩减模型也可以称为仿真的代理模型。

[0093] 每个计算出的局部仿真的每个相应的计算出的缩减模型包括具有元素的基。这些基的元素在下文中可以称为基元素。基元素是从全部局部仿真数据计算出的因子分解的分量。基元素也可以称为状态模式。在示例中,基元素是由局部仿真进行仿真的物理系统的能量模式。通过有限数量的状态模式的线性组合,可以在任意时间生成局部仿真的每个状态。线性组合对状态进行近似,并且可以称为缩减状态。

[0094] 基可以写成$B=(e_1;e_2;\cdots e_n)$,其中e_i是基元素。任何状态state(t)在时间t处都可以通过其缩减状态PState(t)进行近似,该缩减状态是这些基元素的线性组合,如下所示:

[0095] $PState(t)=w_1(t)*e_1+w_2(t)*e_2+\cdots+w_n(t)*e_n$ (公式(1))

[0096] 这里,w_i是用于计算缩减状态PState(t)的每个基元素的贡献的权重。基B随时间保持恒定,并且只有权重可以随时间演变。及时更新权重使仿真结果在时间上提前。计算仿真的缩减模型包括在所有时间t计算基B的所有元素以及所有权重,这些时间t是在仿真的初始时间和最终时间之间包括的时间步长。因此,一旦计算出缩减模型,通过使用公式(1),表示在任何时间步长t计算的仿真的任何状态state(t)的任何缩减状态PState(t)都是可用的。

[0097] 图13是示出缩减模型的计算的示例的图。该计算将在全仿真的所有时间步长计算的全仿真的状态1400作为输入。该计算包括基的计算1402,该计算1402基于计算出的全仿真的所有状态1400。在图13的示例中,计算出的基是计算出的全仿真的快照1404的基。换言之,基元素在此示例中是计算出的全仿真的快照。图14中示出了快照1408、1410和1412的三个屏幕截图。

[0098] 创建S0还包括针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,在数据库中存储S50相应的局部仿真实例。相应的局部仿真实例包括相应的计算出的缩减模型。

[0099] 局部仿真的局部仿真实例形成表示局部仿真的数据。局部仿真实例包括局部仿真的相应的计算出的缩减模型。局部仿真实例还可以包括相对于局部仿真的数据,例如,局部仿真的状态(和/或从状态导出的数据)和/或局部仿真的仿真结果(和/或从仿真结果导出的数据)。一般而言,表述“仿真的实例”表示仿真的具体出现,使得执行该方法的系统拥有仿真的示例。局部仿真实例的数据库也可以是局部仿真实例的库。

[0100] 示出局部仿真实例的定义的非限制性示例如下:局部仿真是在给定风况下对风力涡轮机的仿真。局部仿真实例形成表示风力涡轮机的仿真的数据,因为它包括在给定风况下风力涡轮机的计算出的仿真的计算出的缩减模型,并且可能包括在给定风况下相对于风力涡轮机的计算出的仿真的数据。

[0101] 该方法还包括在局部仿真实例的数据库中选择S1至少两个局部仿真实例。

[0102] 在局部仿真实例的数据库中对至少两个局部仿真实例的选择S1可以根据用户动作来执行。典型地,用户访问局部仿真实例的数据库并选择S1局部仿真实例。应当理解,可以至少两次(即,两次或更多次)选择S1一个局部仿真实例,在这种情况下,至少两个局部仿真实例包括同一局部仿真实例的至少两个范例。

[0103] 该方法还包括计算S2全局物理仿真。全局物理仿真的计算S2包括重用S220包括在所选择的至少两个局部仿真实例中的每个局部仿真实例中的每个相应的计算出的缩减模型。

[0104] 在全局物理仿真的计算S2期间重用S220局部仿真的计算出的缩减模型包括在计算中使用局部仿真的计算出的缩减模型的一个或多个缩减状态和/或从局部仿真的计算出的缩减模型的一个或多个缩减状态导出的数据。在示例中,所选择的至少两个局部仿真实例中的至少一个局部仿真的仿真状态和/或从这些仿真状态导出的数据通常可以形成例如在不同的时间步长介入到对全局物理仿真的建模的一个或多个物理模型的(多个)输入和/或(多个)参数和/或(多个)边界条件。在这些示例中,重用S220每个相应的计算出的缩减模型表示当形成所述一个或多个物理模型的(多个)输入和/或(多个)参数时,至少一个局部仿真的缩减状态和/或从这些缩减状态导出的数据替换该仿真状态和/或从这些仿真状态导出的数据。

[0105] 应该理解的是,尽管局部仿真的集合中的每个局部仿真是全局物理仿真的一部分,但是全局物理仿真的计算S2不一定包括重用所有局部仿真的所有相应的计算出的缩减模型。换言之,在全局物理仿真的计算S2期间,可以仍然计算全局物理仿真的独立的局部部分,而不用对应的局部仿真的相应的缩减模型替换该局部部分。但是,至少有两个独立的局部部分(对应于所选择的至少两个局部仿真实例)由两个相应的缩减模型替换。

[0106] 在示例中,全局物理仿真与全局域相关联,并且每个局部仿真与相应的局部域相关联。在这些示例中,该方法还包括在计算S30每个局部仿真的每个相应的缩减模型之前,选择S20局部仿真的相应的感兴趣区。相应的感兴趣区是相应的局部域的非空子域。在这些示例中,在每个局部仿真的每个相应的缩减模型的计算S30处,在相应的感兴趣区的边界处计算每个相应的缩减模型。在这些示例中,该方法还包括,在全局物理仿真的计算S2处,将所选择的至少两个仿真实例中的每个局部仿真的相应的感兴趣区放置S210在全局域中。仅计算全局域的其余部分。其余部分是全局域中被非感兴趣区占用的部分。全局域包括所选择的至少两个局部仿真实例中的每个局部仿真的每个相应的感兴趣区分别占用的区域。

[0107] 仿真域典型地是被网格划分或离散化的。对于某些物理仿真(例如,大规模物理仿真),仿真域的网格划分可能会很棘手,并且可能会遇到并解决多尺度问题。多尺度问题典型地是指仿真域的局部部分需要以与仿真域的其他部分相比不同尺度(例如,以不同的空间离散化)进行网格划分的情况。典型地,全局物理仿真可能要求全局域的特定网格划分,并且局部仿真的集合中的每个局部仿真可能要求(例如,分别要求)对每个相应的局部域的不同的网格划分。然后必须根据这些不同的网格计算全局物理仿真和/或适配物理建模。因此,全局物理仿真的计算S2可能在时间和/或计算资源方面更昂贵。因为没有计算被相应的感兴趣区占用的全局域的每个部分,所以本发明克服了这些困难。在这些感兴趣区的边界处的计算出的相应的缩减模型被重用,因此,在全局物理仿真的计算中仅涉及全局域的其余部分的网格划分。因此,本发明避免或显著减少了多尺度问题。

[0108] 在本发明中,域(分别是子域)就其数学含义而言是域(分别是子域)。域(分别是子域)的边界也应以其数学含义来理解。本发明的域可以是二维或三维域。局部域和全局域是仿真域。仿真域是对现实世界的物理区域进行建模的域,在该现实世界的物理区域中发生与仿真有关的(多个)物理现象。提到仿真与域相关联表示该域是该仿真的仿真域。在示例中,每个相应的局部域和全局域分别被网格划分。例如,在该方法的初始阶段,可以根据用户动作来执行网格划分。在示例中,每个相应的局部域都对应于(例如,等于、等同于)全局域的相应子域。在这些示例中,每个相应的局部域可以对同一现实世界物理区域进行建模,该同一现实世界物理区域与全局域的相应的子域(即,由全局域进行建模的现实世界物理区域的相应的子区域)不同。

[0109] 现在讨论说明全局域和局部域的定义的非限制性示例。该示例涉及先前讨论的对包括风力涡轮机的风电场进行仿真的示例。全局域是对风况下的风电场进行建模的三维体积。每个局部域是三维体积,该三维体积包含一台风力涡轮机的一部分(例如,全部),并且对风力涡轮机和围绕风力涡轮机的空气进行建模。

[0110] 可以自动执行对局部仿真的相应的感兴趣区(也称为感兴趣区域)的选择S20。在这种情况下,可以执行所述选择S20以满足以下标准中的一个或多个:

[0111] -“相应的局部域上的标量值的变化”:在这种情况下,由于已知所有的仿真结果和计算出的局部仿真的状态,因此该方法可以基于这些结果和状态来计算和/或标识与相应的局部域上的局部仿真相关的一个或多个标量值的变化,例如,能量和/或能量的交换的变化。然后,该方法可以根据这些变化自动选择感兴趣区,例如,通过选择较小的框作为感兴趣区,在该较小的框中,所有变化(或变化的预定的很大一部分)大于预定的阈值和/或小于预定的最大值。可以根据状态模式来计算一个或多个标量值的变化,例如,根据当计算能量或能量交换的变化时的能量模式。这样的标准选择相应的感兴趣区作为相应的局部域的一部分,在该局部域中发生给定的物理现象(例如,能量交换)的基本部分。可以根据用户动作(例如,在方法的初始阶段)来选择预定的阈值和/或预定的最大值。

[0112] -“固体周围的较小的框”:在这种情况下,局部仿真对物理现象进行仿真,其中涉及诸如物理对象或产品之类的固体。相应的局部域典型地包含对固体的表示(例如,几何形状),然后,该方法自动选择S20包含固体的较小的框。

[0113] 典型地,还可以执行对局部仿真的相应的感兴趣区的选择S20,以满足上面的标准的任何合理组合。该方法可以例如选择相应的感兴趣区,使得该感兴趣区包含局部域中包括的固体和围绕该固体的标量(例如,诸如能量之类的物理量)的显著变化两者。另外地,该方法可以自动地防止所选择的相应的感兴趣区为空和/或太大(例如,大于相应的局部域和/或大于全局域)。

[0114] 在示例中,可以根据用户动作来执行对局部仿真的相应的感兴趣区的选择S20。在这些示例中,可以自动地禁止用户选择空的和/或太大的子域。在示例中,可以例如在GUI上将每个局部仿真显示给用户,用户通过(例如,利用触摸或触觉设备)与GUI进行交互以在每个显示的局部仿真上选择每个感兴趣区来执行选择S20。

[0115] 现在参考图8和图9描述根据用户动作对相应的感兴趣区进行选择S20的示例。用户加载S10局部仿真82。局部仿真82及其相应的局部域84显示在GUI的窗口80中。尽管图9和图10是屏幕截图,但是应该理解,其可能是显示在窗口80内的例如局部仿真随时间的进展

的视频。通过使用触觉设备或触摸,用户形成他/她希望在相应的局部域84内选择的相应的感兴趣区86。折线90表示相应的感兴趣区86的边界。用户可以通过形成相应的感兴趣区86的边界(此处为折线90)来形成相应的感兴趣区86。

[0116] 在示例中,在相应的感兴趣区的边界处计算S30每个局部仿真的每个相应的缩减模型。在相应的感兴趣区的边界处计算S30相应的缩减模型包括在相应的感兴趣区的边界上或基本上在相应的感兴趣区的边界上计算对应的局部仿真的缩减状态。例如,可以计算对应的局部仿真的所有缩减状态,但是可以仅保留在相应的感兴趣区的边界上或基本上在相应的感兴趣区的边界上的那些状态。在这种情况下,在相应的感兴趣区内部的缩减状态将不被保留。在占用全局域的区域的相应的感兴趣区的边界处计算的缩减状态足以在由相应的感兴趣区占用的区域与全局域的其余部分之间的接合处计算S2全局物理仿真。这允许对其余部分进行仿真和/或计算,而无需重新计算所占用的区域。在示例中,为了对全局域的所占用的区域与其余部分之间的通信和/或接合和/或交换进行建模和/或仿真和/或近似和/或计算,在计算中使用在所占用的区域的边界处计算的缩减状态实际上是足够的。

[0117] 将相应的感兴趣区放置S210在全局域中包括用相应的感兴趣区替换全局域的区域。可以根据用户动作来执行放置S210。在示例中,例如在GUI上显示相应的感兴趣区,并且用户将相应的感兴趣区移动(或移位)到也显示在附近的全局域中。可以通过(例如,利用触摸或触觉设备)与GUI进行交互来执行对相应的感兴趣区的移动。例如,如本领域中已知的,用户执行拖放操作。在将相应的感兴趣区移动到全局域中之后,该方法可以自动地用相应的感兴趣区替换全局域中已经在其上移动了相应的感兴趣区的区域。如果在放置S210相应的感兴趣区期间放置了若干相应的感兴趣区,则该方法可以自动地防止感兴趣区的任何重叠。在示例中,用户例如通过使用键盘进行输入,其中相应的感兴趣区将被放置在全局域中。

[0118] 现在参考图11讨论放置S210相应的感兴趣区的示例。在该示例中,例如在GUI上将窗口110显示给用户。窗口110内的图框112包括三个局部仿真的三个先前选择的相应的感兴趣区114。相应的感兴趣区中的一个可以是图9的相应的感兴趣区96。尽管图11是屏幕截图,但是应该理解,其可能是显示在窗口110内的例如随时间的进展的每个局部仿真的每个相应的感兴趣区的视频。用户将他希望放置的每个相应的感兴趣区移动到全局物理仿真116的全局域118中,该全局域显示在窗口110内,并且由此将相应的感兴趣区放置在他/她期望的位置。一个相应的感兴趣区可以被移动多次。其余部分,即,全局域118中被非相应的感兴趣区占用的部分,是全局域118中在对全局物理仿真的计算S2处计算的唯一部分。

[0119] “仅计算全局域的其余部分”意味着仅计算在其余部分中的全局物理仿真的仿真状态和/或结果。

[0120] 参考图6和图7,现在讨论以下两个示例之间的比较:根据如图6中示出的现有技术的方法对多个物理仿真实例一起仿真的示例与根据如图7中示出的本发明的方法对多个物理仿真实例一起仿真的示例。在两个示例中,都需要对在给定的风况下在风电场中工作的三台风力涡轮机进行仿真。

[0121] 在图6中的现有技术的示例中,需要完全运行仿真60,该仿真60包括对给定的风力涡轮机进行的三个仿真62、64和66。对给定的风力涡轮机进行的每个仿真62、64和66都是完全计算的。当对给定的风力涡轮机进行的仿真62、64和66中的至少一个被移动到仿真60的

域68中时，仿真60必须再次被完全计算，这包括再次完全计算对给定的风力涡轮机进行的每个仿真62、64和66。

[0122] 在图7中的方法的示例中，在局部仿真实例的数据库的创建S0期间，用户加载对在给定的风况下的风力涡轮机的局部仿真70。局部仿真与相应的局部域700相关联。该方法选择S20局部仿真70的相应的感兴趣区702。这里，例如根据上面所描述的图8和图9的示例，根据用户动作来执行对相应的感兴趣区的选择S20。在相应的感兴趣区702的边界704处计算S30局部仿真70的相应的缩减模型，并且该相应的缩减模型被包括在与局部仿真70相对应的局部仿真实例中，该局部仿真实例被存储在局部仿真实例的数据库中。在对至少两个局部仿真实例的选择S1处，与局部仿真70相对应的局部仿真实例被用户选择三次。用户将局部仿真70的相应的感兴趣区的三个范例74、76和78放置S210在全局物理仿真(即，对包括在风况下工作的三台风力涡轮机的风电场进行的仿真)的全局域72中。在对全局物理仿真的计算S2处仅计算全局域72的其余部分，即，被非感兴趣区占用的部分。有利地，不需要重新运行对风力涡轮机区域进行的非常昂贵的仿真。

[0123] 在示例中，该方法包括在放置S210所选择的至少两个局部仿真实例中的每个局部仿真的相应的感兴趣区处，使相应的感兴趣区的边界与全局域中由相应的感兴趣区占用的区域的边界接合。

[0124] 接合包括对涉及全局物理仿真的计算的至少一种算法和/或数值方法的修改或一系列修改。接合由此在至少一种算法和/或数值方法中并入了相应的感兴趣区以及在相应的感兴趣区的边界处计算的相应的缩减模型，这允许通过重用(多个)相应的缩减模型来计算全局物理仿真。可以例如在用户拖动全局域中的相应的感兴趣区时自动执行修改或一系列修改。也可以根据用户动作(例如，通过与键盘和/或触觉设备的交互)来执行修改或一系列修改。

[0125] 现在参考图15讨论接合的实现方式。

[0126] 图15示出了全局仿真的全局域Ω和至少一个局部仿真中的一个局部仿真的局部域Ωm。在该实现方式中，全局域Ω和局部域Ωm分别地(例如，不同地)离散化。图15示出了由白色区域示出的局部域Ωm的相应的感兴趣区1500。在该实现方式中，局部域Ωm包括恢复区域1502，该恢复区域1502是局部域Ωm中未被感兴趣区1500占用的区域。

[0127] 在该实现方式中，接合基于Ω的离散化与感兴趣区1500的对应点。对应点是位于感兴趣区1500的边界处或基本上位于感兴趣区1500的边界处的点。对应点被示为图15中的标记点(bullet point)。为了清楚起见，这仅为示例，但是对应点不一定是标记点。在该实现方式中，在对应点上或基本上在对应点上以及在恢复区域1502上或基本上在恢复区域1502上计算局部仿真的缩减状态。然后，接合包括验证在对应点上或基本上在对应点上计算的缩减状态与在恢复区域1502上或基本上在恢复区域1502上计算的缩减状态之间的一致性。验证一致性可以包括确定在对应点上或基本上在对应点上计算的缩减状态的物理量(例如，能量或位移)与在恢复区域1502上或基本上在恢复区域1502上计算的缩减状态的物理量是否是同质的。当确定物理量是同质的时，如先前所讨论的，然后接合可以在至少一种算法和/或数值方法中并入感兴趣区1500以及在对应点处计算的计算出的缩减模型。

[0128] 替代实现方式不使用恢复区域1502。在这些替代实现方式中，接合不包括验证一致性。在这些替代实现方式中，如先前所讨论的，接合可以在至少一种算法和/或数值方法

中直接并入感兴趣区1500以及在对应点处计算的计算出的缩减模型。

[0129] 在示例中,方法还包括在对相应的缩减模型的计算S30之后,针对局部仿真的集合中的每个局部仿真,定义S40探针。探针是局部仿真的相应的局部域的点,这些点与相应的感兴趣区相邻。每个探针包括局部仿真的仿真数据。在这些示例中,包括相应的计算出的缩减模型的所存储的局部仿真实例还包括探针和相应的感兴趣区。

[0130] 定义S40探针以及对其进行存储改进了对全局物理仿真的计算S2的准确度,这是因为局部仿真数据被存储并且可以用于计算S2除了相应的计算出的缩减模型。

[0131] 探针中包括的仿真数据指代从探针所对应的局部仿真的仿真结果和/或仿真状态导出的任何数据。除了耦合到计算出的缩减模型本身之外,探针(例如,所有探针)还可以耦合到在重用步骤S220处的计算中要使用的相应的计算出的缩减模型。仿真数据还可以包括仿真结果和/或仿真状态。在示例中,探针均匀地分布在(或基本上均匀地分布在)每个感兴趣区的边界上。这允许在相应的感兴趣区周围的任何位置访问相同级别的仿真数据。

[0132] 可以半自动执行对探针的定义S40,例如,在选择S20相应的感兴趣区时,在这种情况下,该方法可以自动地沿着相应的感兴趣区的边界创建探针的均匀分布。在这些示例中,用户然后可以选择和/或导出和/或取回仿真数据并将其记录在探针上。可替代地,用户可以选择探针的位置,然后选择和/或导出和/或取回仿真数据并且将其记录在探针上。在任何情况下,对探针的定义S40包括探针的创建以及对仿真数据的选择和/或导出和/或取回,以及在创建的探针上对仿真数据的记录。

[0133] 在示例中,在存储步骤S50处存储探针和相应的感兴趣区。在示例中,按感兴趣区的探针数量大于例如在该方法的初始阶段根据用户动作选择的预定的阈值。这确保满足一定的准确度要求。实际上,探针越多,在对每个全局仿真的计算S2处要访问和使用的仿真数据就越多,计算S2的准确度就越高。

[0134] 参考图8、图9和图10,现在描述定义S40探针的示例。在该示例中,已经根据先前描述的图8和图9的示例执行了对局部仿真82的提供S10和对相应的感兴趣区86的选择S20。在对相应的感兴趣区86进行选择S20之后,用户定义S40基本上在相应的感兴趣区86的边界90上的探针。仅出于解释的目的,探针由与图10中的边界90相邻的正方形表示。可以通过例如根据用户与GUI的交互拾取探针的定位(即,在边界90上(或基本上在边界90上)的点)来执行定义S40探针,并且基本上在拾取位置处自动创建表示探针的正方形。然后,可以选择和/或取回要包括在探针中的仿真数据并将其记录在探针中。

[0135] 现在参考图12描述在已经针对每个局部仿真实例定义了探针的情况下的放置S210的示例。具体地,图12示出了图11的放置S210相应的感兴趣区的示例,但是其中的差异在于,根据参考图8、图9和图10描述的上述示例,在所有相应的感兴趣区114上已经定义了S40探针。在图12中,探针显示在已经移动到全局域118中的相应的感兴趣区上。

[0136] 在示例中,在对全局物理仿真的计算S2期间,至少两个所选择的局部仿真实例中的至少两个局部仿真实例交互。交互导致至少两个局部仿真实例中的至少一个局部仿真实例的探针被富集S221。由于富集S221探针,如图4中示出的,对包括在其探针被富集的局部仿真实例中的相应的计算出的缩减模型进行校正S225。

[0137] 因此,该方法考虑了全局物理仿真的局部部分之间的交互。这些交互实际上可以对应于真实的物理交互(例如,对其建模)。因此,该方法允许在对现实世界中可能发生的现

实世界交互进行仿真的同时，对全局物理仿真进行仿真。因此，从物理的角度来看，所得到的仿真的全局物理仿真更加准确。

[0138] 当执行对两个仿真实例之一的一个相应的计算出的缩减模型的重用S220需要对两个仿真实例中的另一个的相应的计算出的缩减模型进行校正，以执行对两个仿真实例中的所述另一个的相应的计算出的缩减模型的重用S220和/或相反时，两个仿真实例交互。在示例中，单词“需要”应被理解为“理论上需要”，其意味着理论上需要对两个仿真实例中的另一个的相应的计算出的缩减模型进行校正。然而，该方法可以确定交互足够弱，使得该方法实际上不执行理论校正。这一点将在后面详细描述。

[0139] 两个局部仿真实例(例如，第一局部仿真实例与第二局部仿真实例)之间的交互导致两个局部仿真实例中的至少一个(例如，第一局部仿真实例)的探针被富集。富集探针意味着富集一个或多个探针。富集第一局部仿真实例的探针可以包括将仿真数据添加到探针，例如，从第二局部仿真实例的至少一个探针的仿真数据中取回和/或导出的仿真数据。可替代地或另外地，富集探针可以包括移除已经包括在探针中的仿真数据。可替代地或另外地，富集探针可以包括修改已经包括在探针中的仿真数据。可以理解，在适当的情况下，可以类似地富集第二局部仿真实例的探针或两个局部仿真实例的探针。

[0140] 在示例中，局部仿真实例的探针与局部仿真实例的相应的计算出的缩减模型相关，并且根据该关系，富集探针中的一个或多个会(例如，自动)触发对相应的计算出的缩减模型的校正。在示例中，校正S225相应的缩减模型意味着修改其缩减状态(或其缩减状态的一部分)，例如，通过修改基元素(或其一部分)和/或权重(或其一部分)，或通过修改有助于所述缩减状态(或所述缩减状态的所述部分)的状态模式的数量。

[0141] 返回参考上面描述的图12的示例，每个局部仿真实例的探针显示在感兴趣区上。在示例中，这种显示的目的是帮助用户放置相应的感兴趣区。实际上，如何捕获局部仿真实例之间的交互可以取决于探针的数量以及其在每个相应的感兴趣区上的位置。通过显示探针，用户可以因此执行对相应的感兴趣区的放置S210，以捕获他真正希望仿真的交互量。

[0142] 在示例中，该方法还包括针对其探针被富集的每个局部仿真实例，在对相应的计算出的缩减模型的校正S225之前，计算S222所有经富集的探针的集合与对应探针在其被富集之前的集合之间的差异。在这些示例中，该方法还包括确定S223差异是否超过预定的阈值。在这些示例中，该方法还包括如果确定差异超过预定的阈值，则校正S225相应的计算出的缩减模型。图4示出了图4的这种示例。

[0143] 通过使对相应的计算出的缩减模型的校正S225适应于确定差异超过了预定的阈值，该方法仅考虑重要的交互。在示例中，这意味着该方法仅考虑对应于现实世界物理交互(例如，对其仿真、建模)的交互和/或丢弃可能由于或对应于数值假象的交互。

[0144] 差异可能意味着存在差距、矛盾或错误。差异可以在于表述经富集的探针如何不同于在其富集之前的对应的(即，相同的)探针(例如，经富集的探针的仿真数据如何不同于探针在其未被富集时的仿真数据)的一个或多个数值。可以通过该方法自动执行确定S223差异超过预定的阈值。在示例中，可以根据用户动作(例如，在方法的初始阶段)来选择预定的阈值。

[0145] 如果确定差异超过阈值，则该方法执行对计算出的缩减模型的校正S225。在示例中，对计算出的缩减模型的校正S225可以例如与对全局物理仿真的计算S2中的其他计算相

结合地触发对探针的新的富集S221。即,可以在对全局物理仿真的计算S2的执行期间对富集S221和校正S225进行迭代S226。然而,如果差异没有超过阈值,则计算出的缩减模型将不被校正(即,计算出的缩减模型保持不变)。在示例中,由于对全局仿真的计算S2中的其他计算,该方法仍然可以预期对探针的新的富集S221。即,可以在对全局仿真的计算S2的执行期间对富集S221和确定S223进行迭代S226。换言之,在对每个全局仿真实例的计算S2期间,该方法可以执行对以下各项的迭代S226:富集S221和确定S223和/或富集S221和校正S225。

[0146] 在示例中(例如,图2所示的示例),该方法还包括在对局部仿真实例的数据库的创建S0处,学习S60机器学习算法。在存储在数据库中的局部仿真实例上学习S60机器学习算法。针对数据库中的每个局部仿真实例,机器学习提供存储在局部仿真实例中的探针与存储在局部仿真实例中的相应的计算出的缩减模型之间的相应的关系。在这些示例中,针对每个局部仿真实例,校正S225包括在局部仿真实例中的相应的计算出的缩减模型包括应用S224机器学习算法。基于相应的关系来执行校正S225。

[0147] 机器学习算法用作校正S225相应的计算出的缩减模型的工具。在对数据库的创建S0处学习该机器学习算法,并且在适当的情况下,在校正S225处使用该机器学习算法。因此,在不需要重新计算任何局部仿真的情况下考虑交互,但要使用已经在计算出的局部仿真上学习到的信息。

[0148] 可以通过任何已知的机器学习技术来学习机器学习算法。在存储在数据库中的局部仿真实例上学习机器学习算法意味着该数据库形成了机器学习算法的学习集或训练集。因此,机器学习算法的学习集或训练集包括所有局部仿真的所有缩减模型、探针和感兴趣区。机器学习算法也可以称为校正模型。

[0149] 针对每个局部仿真实例,相应的关系包括一个或多个数学公式和/或一种或多种算法,这些公式和算法提供局部仿真实例的相应的计算出的缩减模型与探针之间的对应。在示例中,所有相应的关系的集合形成了机器学习算法的决策森林。

[0150] 针对其探针被富集的每个局部仿真实例,校正S225局部仿真实例的相应的计算出的缩减模型包括仅在已经确定S223差异超过预定的阈值时,应用S224机器学习算法。在示例中,机器学习算法将模式和/或权重(例如,其全部)和/或从模式和/或权重导出的数据(例如,缩减状态,例如,所有的缩减状态)和局部仿真实例的探针(例如,所有探针,例如,仅被富集的探针)作为输入。在示例中,将这些输入推入所有相应的关系的集合,并且机器学习算法输出对相应的计算出的缩减模型的校正。校正可以在于包括以下各项的新的相应的计算出的缩减模型:新的权重和/或新的状态模式和/或未经校正的相应的计算出的缩减模型的权重和/或未经校正的相应的计算出的缩减模型的状态模式。

[0151] 在示例中,在由于对探针的富集S221而对相应的缩减模型的每次校正S225处,将仿真实例存储在数据库中,该仿真实例包括经校正的缩减模型和经富集的探针。

[0152] 因此,数据库被富集有新的局部仿真实例,该新的局部仿真实例来自对全局物理仿真的计算S2。

[0153] 返回参考图1,在示例中,该方法包括在对全局物理仿真的计算S2之后,将新的局部仿真实例添加S3到局部仿真实例的数据库中。添加S3新的局部仿真实例包括提供新的局部仿真。新的局部仿真已经被计算,并且与相应的局部域相关联。添加S3新的局部仿真实例包括选择新的局部仿真的相应的感兴趣区。相应的感兴趣区是相应的局部域的非空子域。

添加S3新的局部仿真实例包括在相应的感兴趣区的边界处计算新的局部仿真的相应的缩减模型。添加S3新的局部仿真实例包括定义探针。探针是相应的局部域的点,这些点与相应的感兴趣区相邻。每个探针包括新的局部仿真的仿真数据。添加S3新的局部仿真实例包括将新的局部仿真实例存储在数据库中。所存储的新的局部仿真实例包括新的局部仿真的相应的缩减模型、新的局部仿真的探针以及新的局部仿真的相应的感兴趣区。添加S3新的局部仿真实例导致新的局部仿真实例是局部仿真实例的数据库中的局部仿真实例中的一个。该方法还包括在添加S3新的局部仿真实例之后,在仿真实例的数据库上重新学习S4机器学习算法。该方法还包括在局部仿真实例的数据库中重新选择S5至少两个局部仿真实例。所重新选择的至少两个局部仿真实例包括新的局部仿真实例。该方法还包括利用所重新选择的至少两个局部仿真实例来重新计算S7全局物理仿真。

[0154] 因此,该方法使得可以利用新的局部仿真实例来富集局部仿真实例的数据库,并且可以在该经富集的数据库上重新学习机器学习算法。当重新计算全局物理仿真时,然后可以将他/她已经选择要添加到全局物理仿真中的数据库的新的局部仿真实例包括在内,并且享受改进的机器学习算法来执行计算。

[0155] 对新的局部仿真的提供可以作为对局部仿真的集合中的每个局部仿真的提供S10来执行。对新的局部仿真的相应的感兴趣区的选择可以作为对局部仿真的集合中的每个局部仿真的每个相应的感兴趣区的选择S20来执行。对新的局部仿真的相应的缩减模型的计算可以作为对局部仿真的集合中的每个局部仿真的每个相应的缩减模型的计算S30来执行。对新的局部仿真的探针的定义可以作为对局部仿真的集合中的每个局部仿真的探针的定义S40来执行。

[0156] 在局部仿真实例的数据库上重新学习S4机器学习算法在于重新执行对机器学习算法的学习S60,但这一次是在包括新的局部仿真实例的局部仿真实例的数据库上,而不是在先前创建的局部仿真实例的数据库上。

[0157] 重新选择S5至少两个局部仿真实例在于重新执行对至少两个局部仿真实例的选择S1,但这一次是在包括新的局部仿真实例的局部仿真实例的数据库的局部仿真实例中执行选择,而不是在先前创建的局部仿真实例的数据库中。

[0158] 利用所重新选择的至少两个局部仿真实例重新计算S7全局物理仿真在于重新执行对全局仿真实例的计算S2,仅仅针对所重新选择的至少两个局部仿真实例中的局部仿真实例的被重用S220的相应的计算出的缩减模型。

[0159] 在示例中,该方法还包括在重新学习S4之后并且在重新计算S7之前,修改S6全局物理仿真。

[0160] 因此,用户可以计算全局物理仿真的至少两个不同的版本。

[0161] 修改全局物理仿真可以包括改变一个或多个物理参数和/或改变一个或多个边界条件和/或改变全局域的网格划分和/或改变全局物理仿真的时间尺度和/或改变占用全局域的区域的相应的感兴趣区的布置。

[0162] 参考图7,其描述了根据该方法对在给定的风况下在风电场中工作的三台风力涡轮机74、76和78一起仿真的示例,修改全局物理仿真可以例如在于改变风力涡轮机74、76和78在全局域72中的位置和/或改变风况(例如,通过修改全局物理仿真的一个或多个参数和/或一个或多个边界条件)。

[0163] 在示例中,对添加S3和重新计算S7进行迭代S8,如图1中示出的。

[0164] 在示例中,每个局部仿真的每个局部域包括相应的物理对象。局部仿真对与相应的物理对象相关联的相应的物理行为进行仿真。在这些示例中,全局物理仿真对所有相应的物理对象的集合的物理行为进行仿真。

[0165] 在本发明的含义中,物理对象是产品或产品的组装件或现实世界物理实体。与对象相关联的物理行为可以是对象本身的行为,或者是对象在周围环境(例如,现实世界环境)中的行为,或者是与环境交互的对象的行为。与若干对象相关联的物理行为是例如在相同环境(例如,现实世界环境)中所述多个对象一起进行的物理行为。其可以包括对象之间和/或对象与环境之间的交互。

[0166] 下面提供了包含全局物理仿真、物理对象和物理行为的非限制性示例的列表的表。该方法可以预期对下面的表中给出的全局物理仿真的示例中的一个或多个的仿真。

[0167]

全局物理仿真	相应的物理对象	相应的物理行为	对象的集合的物理行为
由各种(例如,不同的)风力涡轮机组成的风电场	风力涡轮机中的一个	风力涡轮机在给定的风况下工作	所有的风力涡轮机在给定的风况下在风电场中一起工作
至少有(例如,不同的)发动机附接到机翼的飞机机翼	发动机中的一个	发动机在给定的飞行和/或着陆和/或起飞条件下工作	由机翼和发动机组成的组装件在给定的飞行和/或着陆和/或起飞条件下工作
用于实现等离子体融合限制的电磁环的组装件	电磁环中的一个	电磁环以不同的电流水平以及其之间的过渡工作	组装件在产生电磁场以限制核融合的条件下
建筑物的天线覆盖范围	无线电天线	天线从给定的建筑物发射	天线的集合能够在城市中在具有良好的覆盖范围的情况下发射

[0168]

具有桌脚的桌子的组装件	桌脚	桌脚承受桌面的重量的行为	组装件在支持桌面上的重量和负载的条件下

[0169] 表1:全局物理仿真的示例

[0170] 在示例中,两个局部仿真实例之间的交互可以对以下非限制性示例的列表中的现实世界物理交互进行建模和/或仿真:

[0171] -由于附近正在工作的另一风力涡轮机而引起的对风力涡轮机周围的风的(多个)扰动;

[0172] -由于附近正在工作的另一飞机发动机而引起的对飞机发动机周围的空气的(多个)扰动;

[0173] -由于附近正在工作的另一飞机发动机而引起的对飞机发动机周围的热量的(多个)扰动;

[0174] -由于附近的环形物而引起的对在热核能发电站中的环形物的周围磁场的(多个)扰动;

[0175] -由于附近的其他天线而引起的对天线无线电覆盖范围的(多个)扰动;

[0176] -由于机械零件之间的结构连接而引起的(多个)扰动。

[0177] 表1中引述的全局物理仿真的任何示例可以以上述表所列出的交互中的一个或多个合理示例为特征。该方法也可以预期上述表中的扰动的合理组合。

[0178] 在示例中,局部仿真的集合中的所有局部仿真都是给定的局部仿真的扰动。在这些示例中,给定的局部仿真也是局部仿真的集合的一部分。

[0179] 如果已经通过改变第二仿真的以下特征中的一个或多个来定义(例如,设置或编程)第一仿真,则第一仿真是第二仿真的扰动:边界条件、初始条件、空间离散化、至少一个物理参数的值、时间尺度。

[0180] 在所有示例中,该方法还可以包括在每次计算全局物理仿真之后,将所有计算出的全局物理仿真(例如,同时地或迭代地)显示在诸如GUI之类的显示器上。

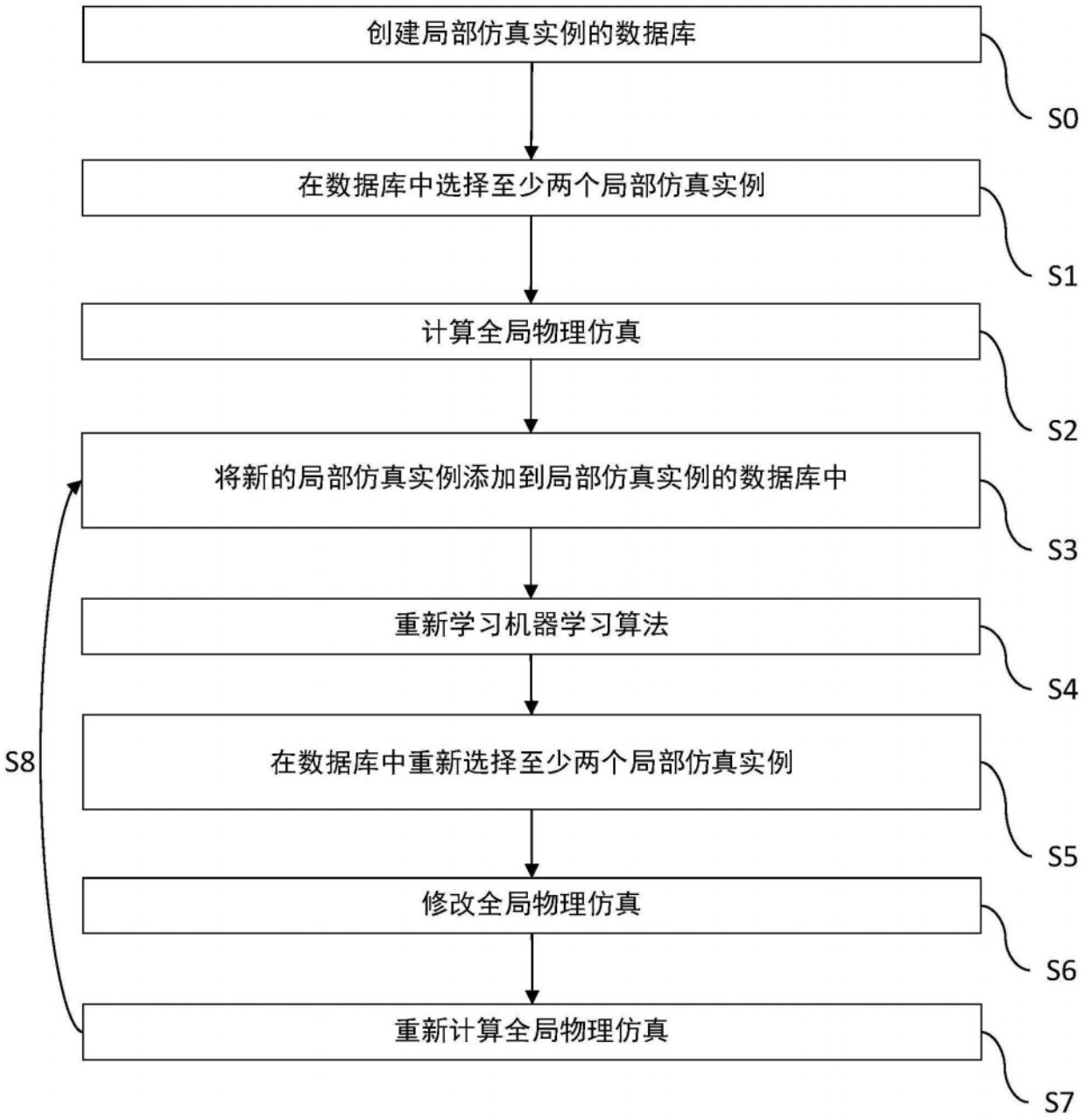

创建局部仿真实例的数据库
S0
在数据库中选择至少两个局部仿真实例
S1
计算全局物理仿真
S2
将新的局部仿真实例添加到局部仿真实例的数据库中
S3
重新学习机器学习算法
S4
在数据库中重新选择至少两个局部仿真实例
S5
修改全局物理仿真
S6
重新计算全局物理仿真
S7
S8

图1

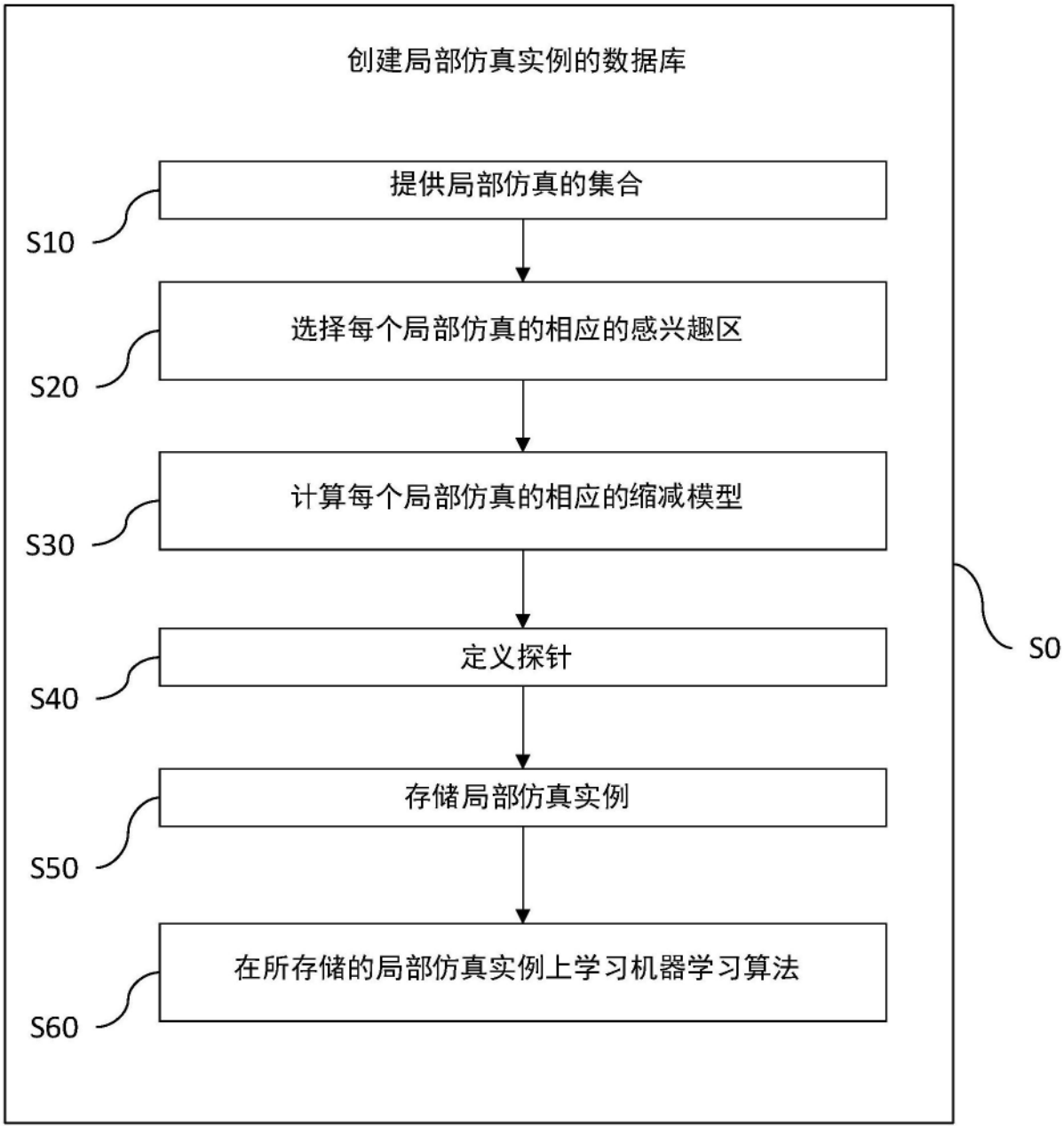

创建局部仿真实例的数据库
提供局部仿真的集合
S10
选择每个局部仿真的相应的感兴趣区
S20
计算每个局部仿真的相应的缩减模型
S30
定义探针
S40
存储局部仿真实例
S50
在所存储的局部仿真实例上学习机器学习算法
S60
S0

图2

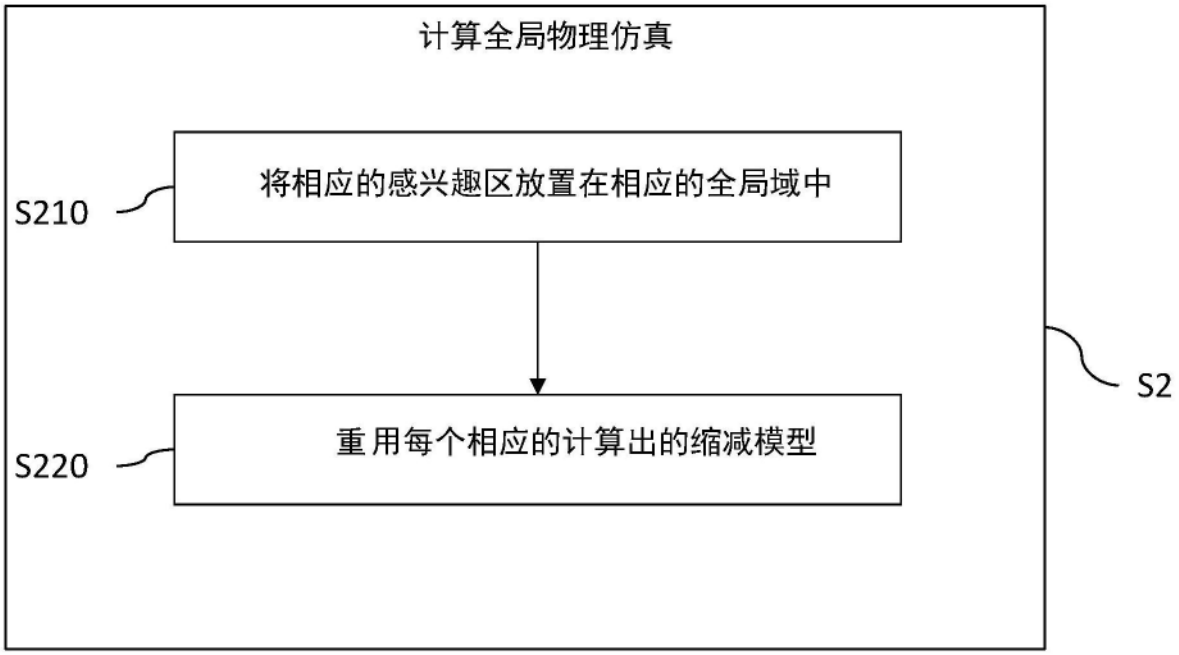

计算全局物理仿真
S210
将相应的感兴趣区放置在相应的全局域中
S220
重用每个相应的计算出的缩减模型
S2

图3

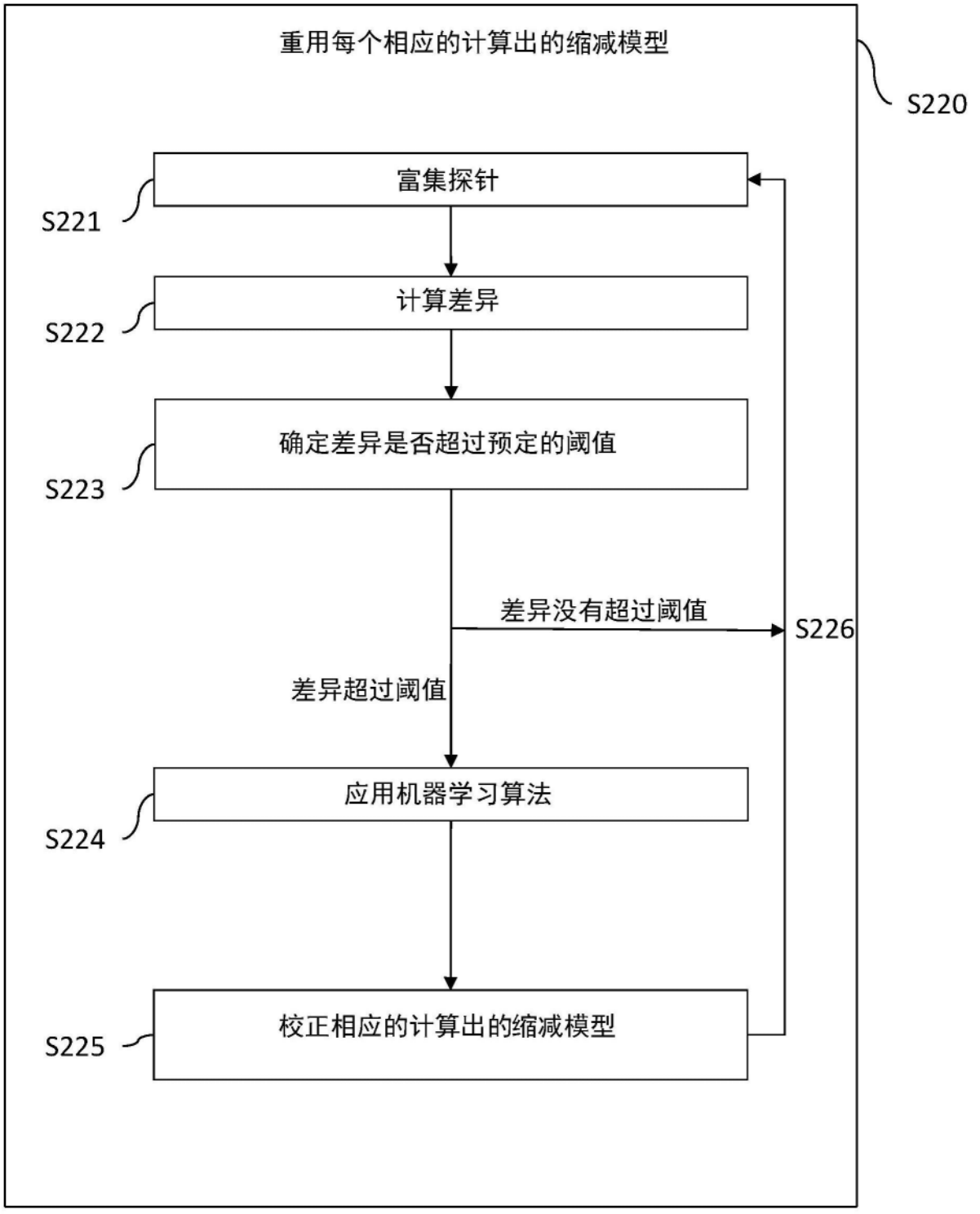

重用每个相应的计算出的缩减模型
S220
富集探针
S221
计算差异
S222
确定差异是否超过预定的阈值
S223
差异没有超过阈值
S226
差异超过阈值
应用机器学习算法
S224
校正相应的计算出的缩减模型
S225

图4

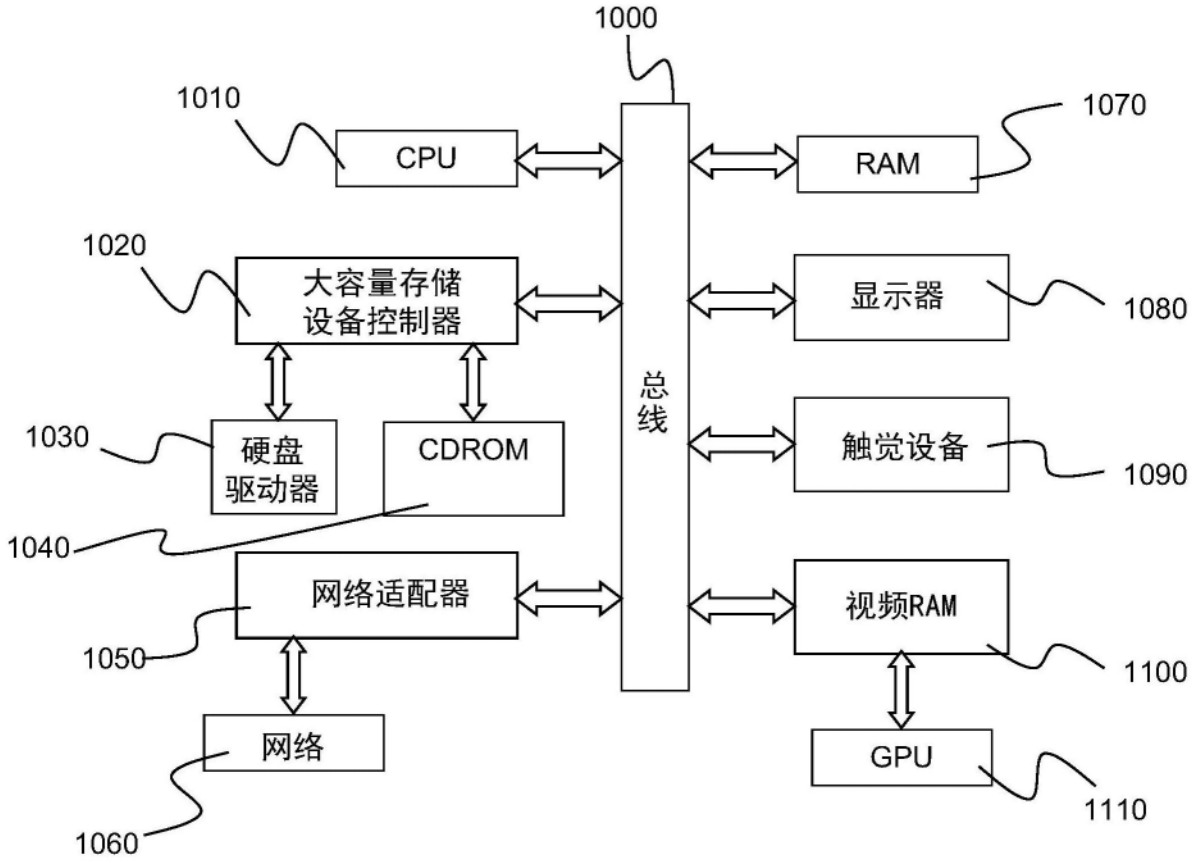

1000
1010
CPU
1070
RAM
1020
大容量存储
设备控制器
显示器
1080
总
线
1030
硬盘
驱动器
CDROM
触觉设备
1090
1040
网络适配器
视频RAM
1050
1100
网络
GPU
1060
1110

图5

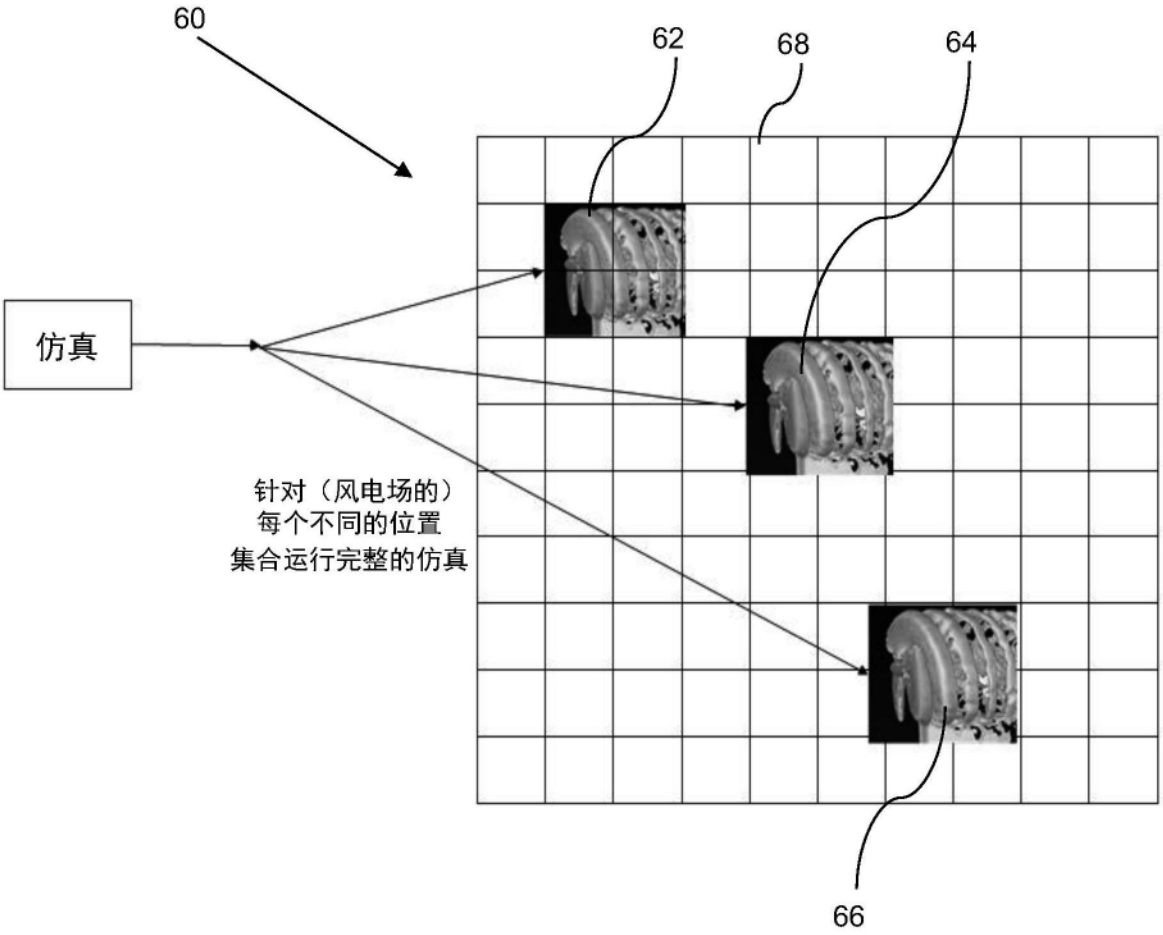


图6

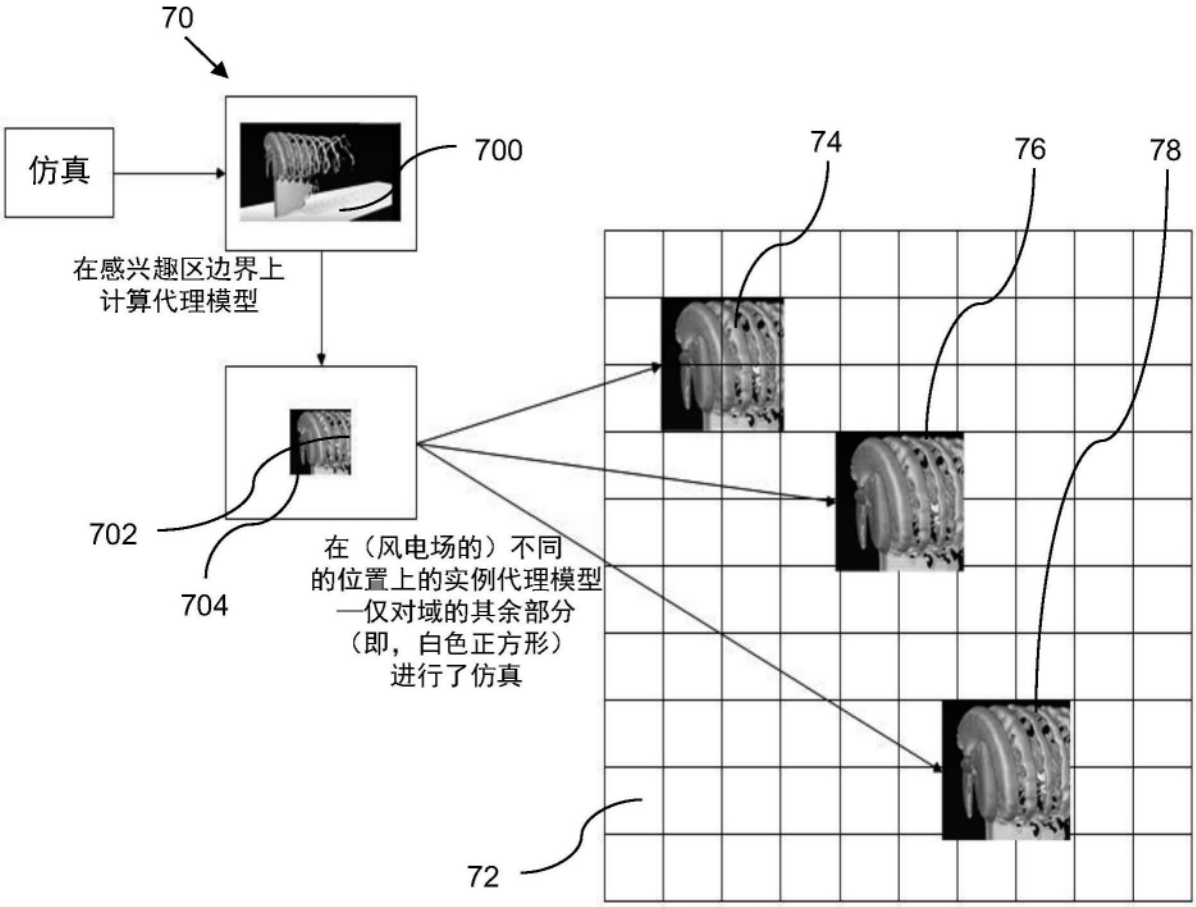

70
仿真
700
在感兴趣区边界上
计算代理模型
74
76
78
702
704
在（风电场的）不同
的位置上的实例代理模型
—仅对域的其余部分
（即，白色正方形）
进行了仿真
72

图7

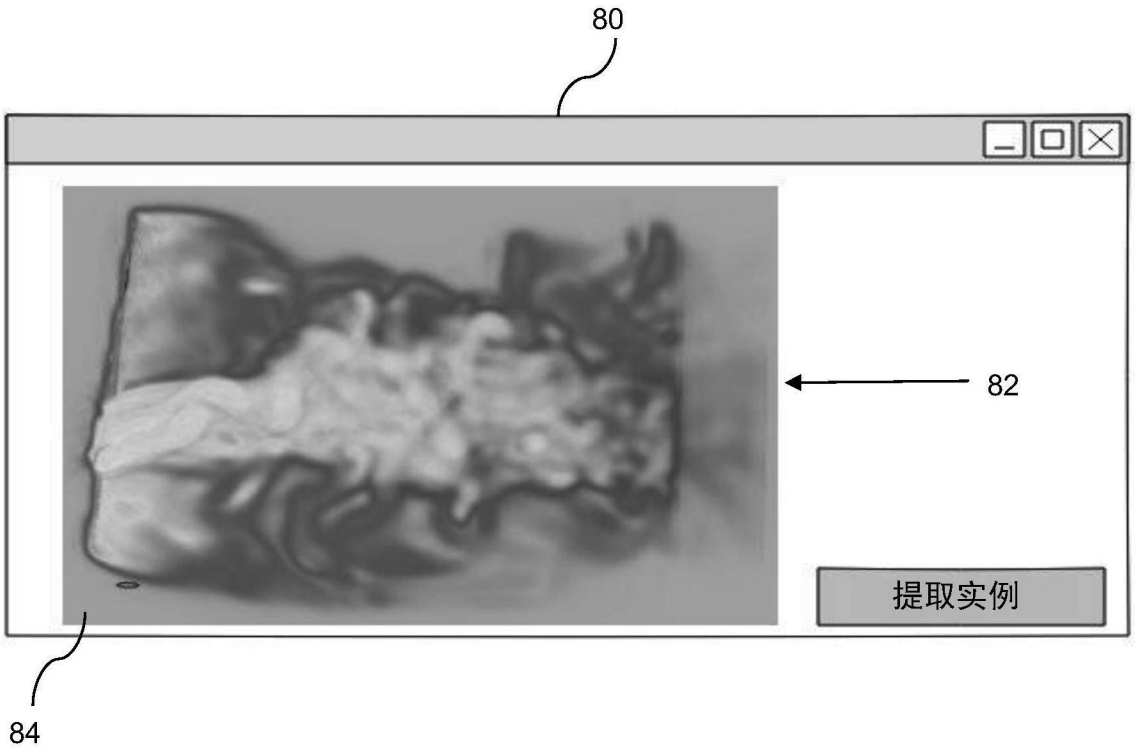


图8

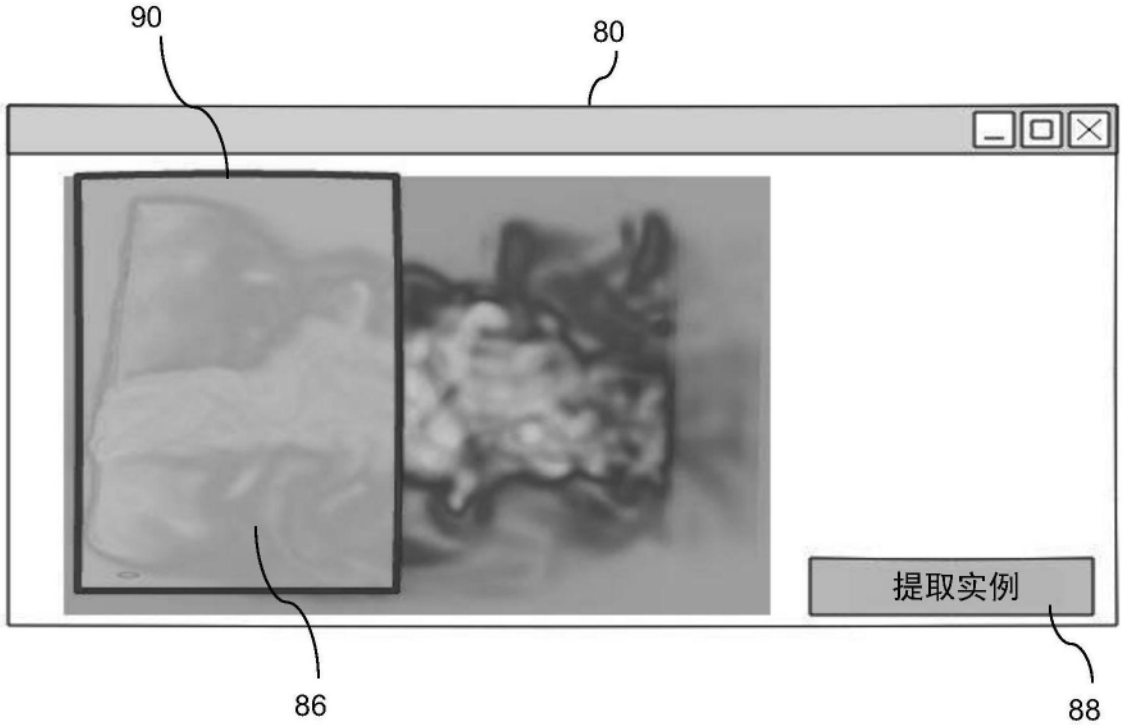


图9

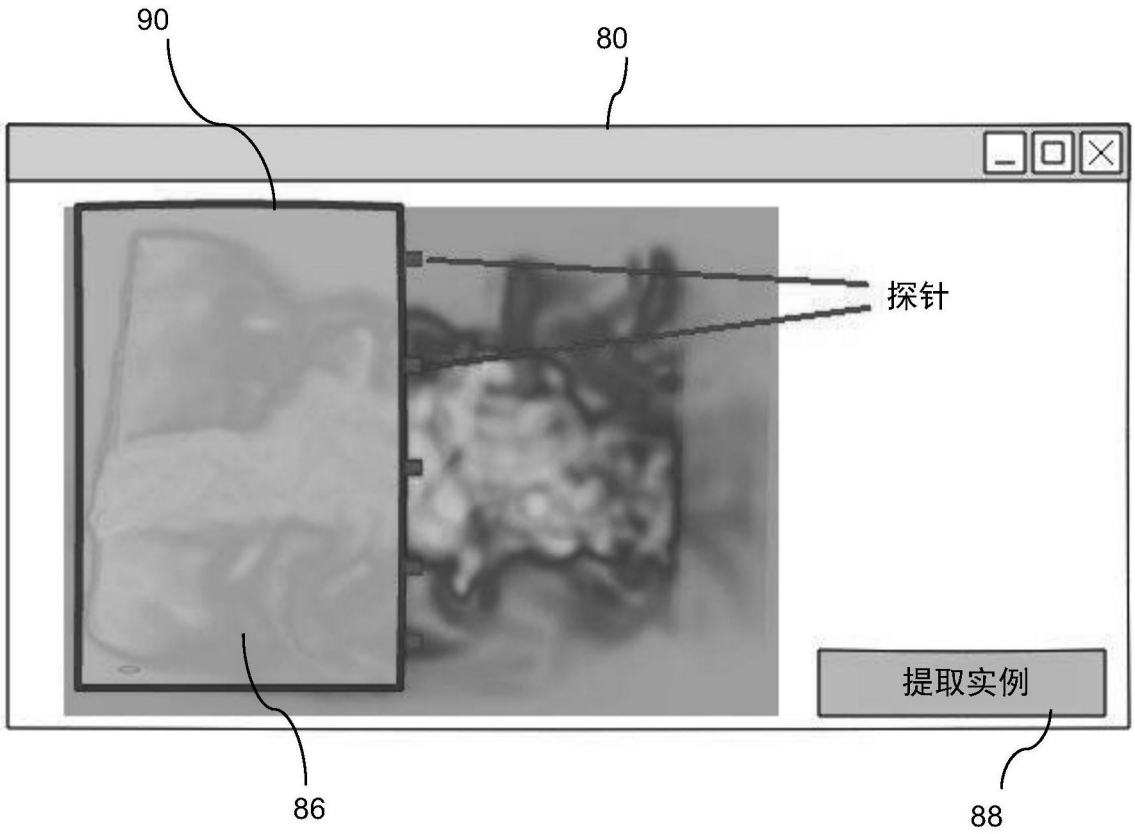


图10

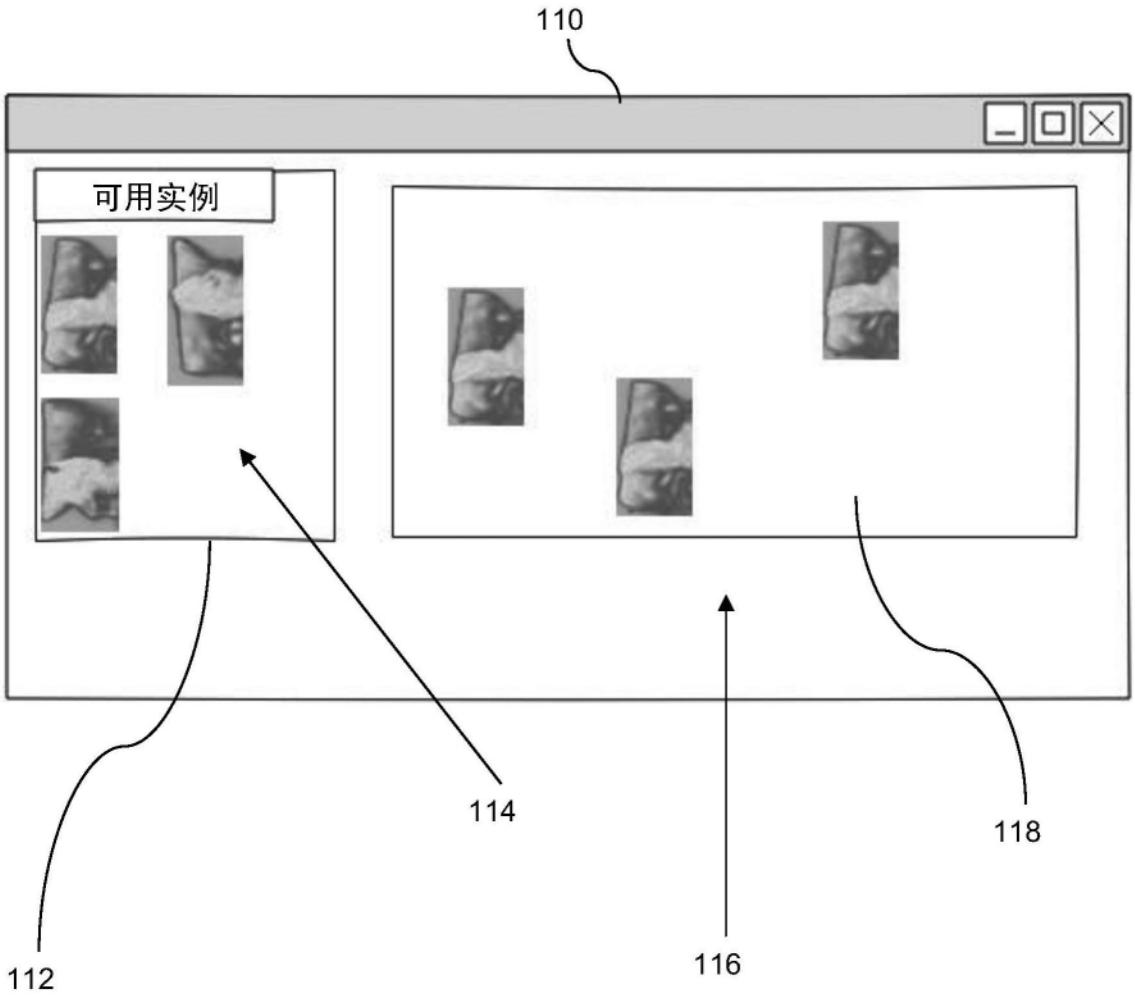


图11

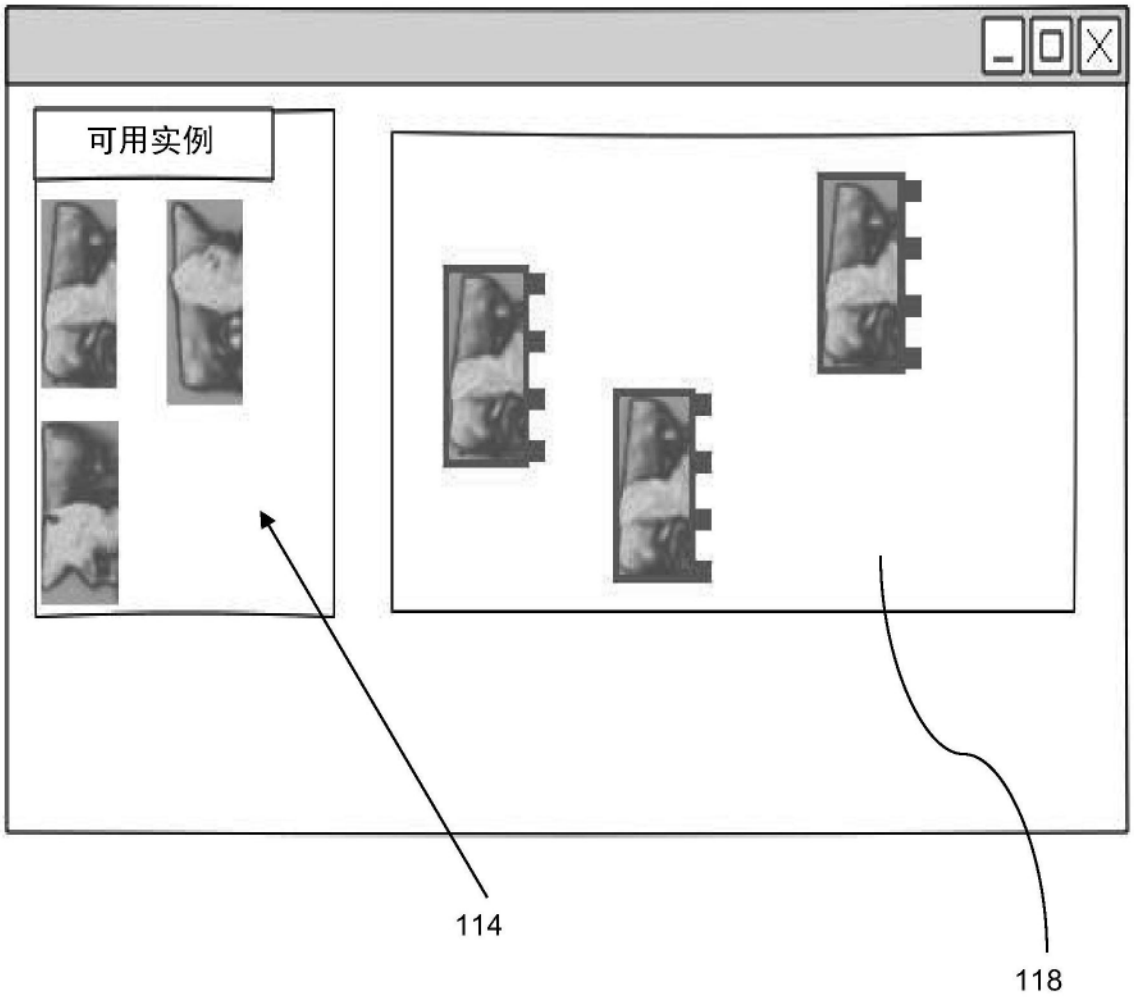


图12

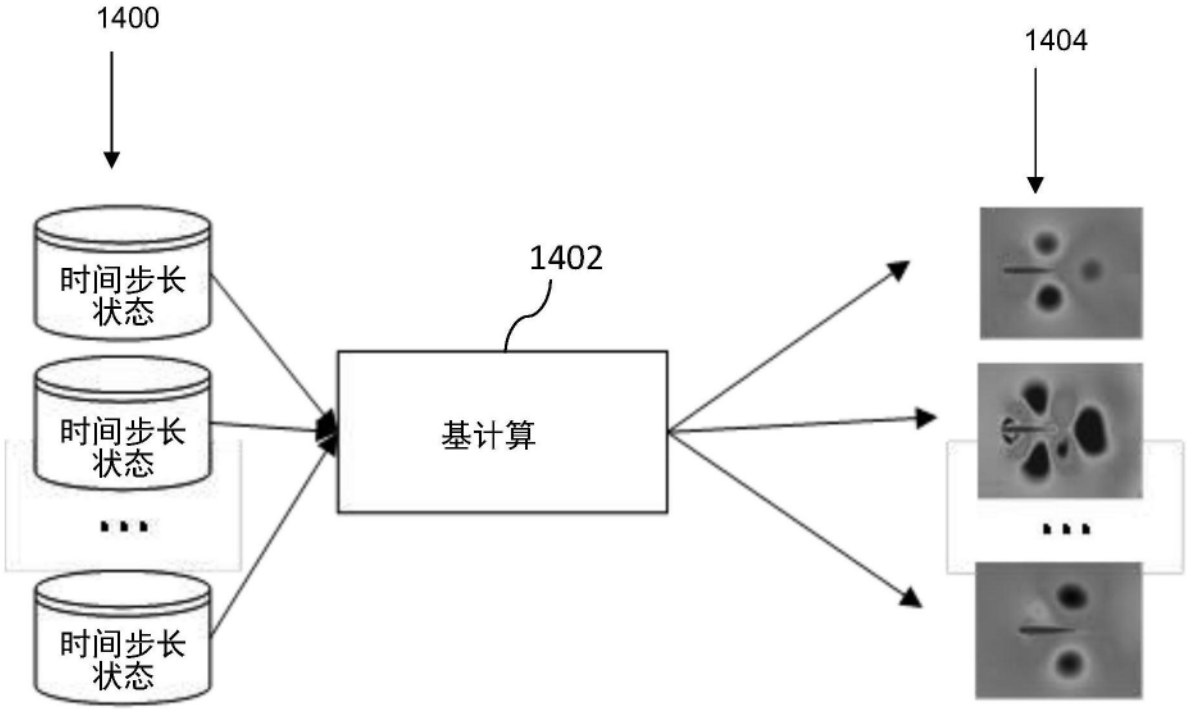


图13

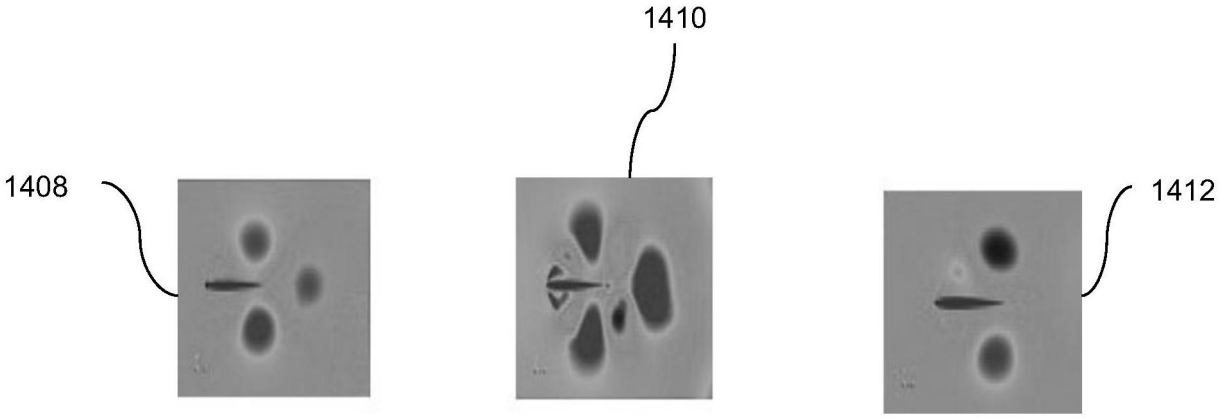


图14

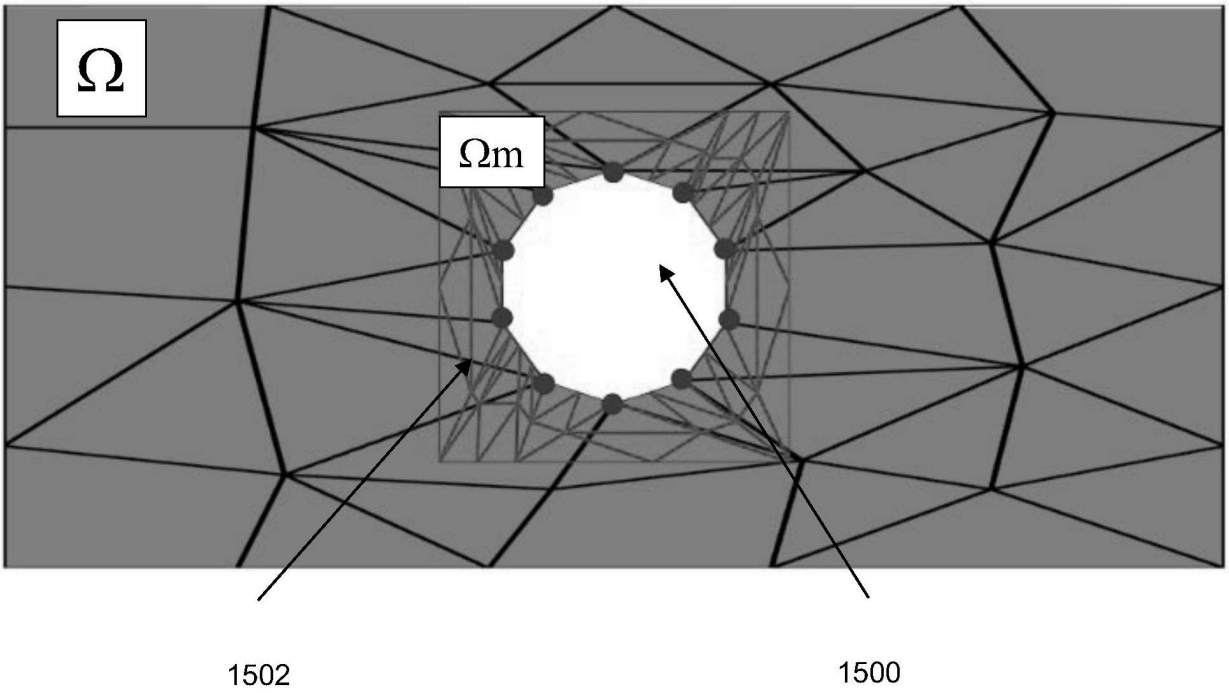


图15