



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113811956 A

(43) 申请公布日 2021. 12. 17

(21) 申请号 202080036393.5

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

(22) 申请日 2020.05.15

代理人 刘艺诗 陈岚

(30) 优先权数据

62/849489 2019.05.17 US

(51) Int.Cl.

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.11.16

G16H 50/50 (2018.01)

G16H 10/60 (2018.01)

G16H 30/40 (2018.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2020/033239 2020.05.15

G06F 30/28 (2020.01)

G06F 17/13 (2006.01)

A61B 5/026 (2006.01)

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2020/236639 EN 2020.11.26

A61B 34/10 (2016.01)

G06F 113/08 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

(71) 申请人 哈特弗罗公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 S·桑卡兰 D·勒萨奇 C·泰勒

肖南 H·J·金 D·斯佩恩

M·沙普

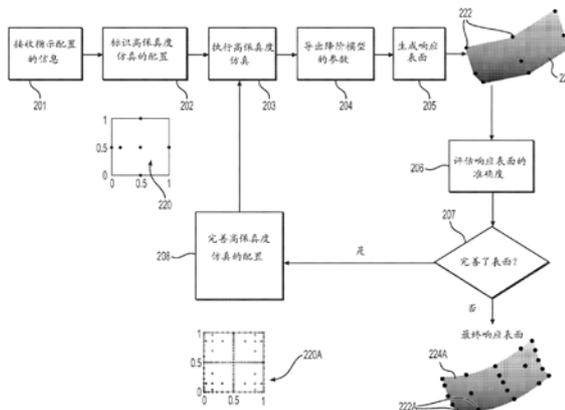
权利要求书3页 说明书16页 附图8页

(54) 发明名称

用于使用响应表面和降阶建模来估计血液流动的系统和方法

(57) 摘要

公开了用于血液流动仿真的系统和方法。例如,一种方法可以包括:使用血管血液流动的第一模型来执行多个血液流动仿真,所述多个血液流动仿真中的每一个对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的几何形状进行仿真;基于所述多个血液流动仿真的结果,生成响应表面,所述响应表面将第一模型的一个或多个第一参数映射到血管血液的降阶模型的一个或多个第二参数;从表示血管系统的修改状态的参数值来确定由所述响应表面映射的降阶模型的一个或多个参数的值;以及使用由所确定的值参数化的降阶模型来执行仿真,以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。



1. 一种用于血液流动仿真的计算机实现方法,所述方法包括:

使用血管血液流动的第一模型来执行多个血液流动仿真,所述多个血液流动仿真中的每一个对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的几何形状进行仿真;

基于所述多个血液流动仿真的结果,生成响应表面,所述响应表面将第一模型的一个或多个第一参数映射到血管血液流动的降阶模型的一个或多个第二参数,所述降阶模型具有比第一模型的保真度更低的保真度;

从表示血管系统的修改状态的参数值来确定由所述响应表面映射的降阶模型的一个或多个参数的值;以及

使用由所述一个或多个第二参数的所确定的值参数化的降阶模型来执行血管系统的修改状态中的血液流动的仿真,以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中

分别针对多个配置执行所述多个血液仿真,

所述多个配置中的每一个包括第一参数的值,所述值表示至少相应的血管几何形状,其中在相应的血液流动仿真中对血液流动进行仿真,并且

所述多个配置包括:

表示患者的血管系统的第一配置;以及

一个或多个另外的配置,每个另外的配置表示从血管系统的几何形状中导出的血管几何形状、和/或不同于由第一配置表示的生理状态的生理状态。

3. 根据权利要求2所述的方法,进一步包括:

接收患者的血管系统的患者特定图像数据;

基于所述图像来生成血管系统的患者特定解剖模型;以及

基于患者特定解剖模型,确定针对第一配置的一个或多个第一参数的值,以表示血管系统的患者特定几何形状。

4. 根据权利要求2所述的方法,其中所述一个或多个另外的配置包括一个或多个极值配置,每个极值配置表示解剖极限或生理极限下的血管系统的状态。

5. 根据权利要求4所述的方法,其中

血管系统是患者的冠状动脉的至少一部分,并且

所述一个或多个极值配置中的至少一个表示冠状动脉的至少所述部分的完全血运重建。

6. 根据权利要求4所述的方法,其中所述一个或多个另外的配置进一步包括:基于所述一个或多个极值配置使用采样或求积方法所确定的一个或多个配置。

7. 根据权利要求2所述的方法,其中

所述多个血液流动仿真的结果是分别针对所述多个配置获得的第一仿真结果,

所述多个配置中的每一个包括所述一个或多个第一参数的第一值,并且

生成所述响应表面包括:

针对所述多个配置中的每一个,确定所述一个或多个第二参数的第二值,第二值在被用于使用所述降阶模型执行的低保真度血液流动仿真中时产生与相应第一仿真结果匹配的相应第二仿真结果;以及

针对所述多个配置中的每一个,基于所述一个或多个第一参数的第一值以及所述一个

或多个第二参数的所确定的第二值来生成所述响应表面。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中

所述响应表面是拟合到点集合的表面,并且

所述点集合中的每个点包括:针对所述多个配置中的相应配置而确定的一个或多个第二参数的所确定的值。

9. 根据权利要求1所述的方法,其中血管系统包括冠状血管系统、外周血管系统、脑血管系统、肾血管系统、内脏血管系统或肝血管系统中的至少一个。

10. 根据权利要求1所述的方法,其中

实时执行实验性血液流动仿真,使得实时确定血液流动特性的值,并且

所述方法进一步包括向用户实时呈现血液流动特性的值。

11. 根据权利要求1所述的方法,其中血液流动特性是血流储备分数。

12. 一种用于血液流动仿真的计算机系统,包括:

存储指令的存储器;

一个或多个处理器,其被配置成执行指令以执行一种方法,所述方法包括:

使用血管血液流动的第一模型来执行多个血液流动仿真,所述多个血液流动仿真中的每一个对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的几何形状进行仿真;

基于所述多个血液流动仿真的结果,生成响应表面,所述响应表面将第一模型的一个或多个第一参数映射到血管血液流动的降阶模型的一个或多个第二参数,所述降阶模型具有比第一模型的保真度更低的保真度;

从表示血管系统的修改状态的参数值来确定由所述响应表面映射的降阶模型的一个或多个参数的值;以及

使用由所述一个或多个第二参数的所确定的值参数化的降阶模型来执行血管系统的修改状态中的血液流动的仿真,以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。

13. 根据权利要求12所述的计算机系统,其中

分别针对多个配置执行所述多个血液仿真,

所述多个配置中的每一个包括第一参数的值,所述值表示至少相应的血管几何形状,其中在相应的血液流动仿真中对血液流动进行仿真,并且

所述多个配置包括:

表示患者的血管系统的第一配置;以及

一个或多个另外的配置,每个另外的配置表示从血管系统的几何形状中导出的血管几何形状、和/或不同于由第一配置表示的生理状态的生理状态。

14. 根据权利要求13所述的计算机系统,进一步包括:

接收患者的血管系统的患者特定图像数据;

基于所述图像来生成血管系统的患者特定解剖模型;以及

基于患者特定解剖模型,确定针对第一配置的一个或多个第一参数的值,以表示血管系统的患者特定几何形状。

15. 根据权利要求13所述的计算机系统,其中所述一个或多个另外的配置包括一个或多个极值配置,每个极值配置表示解剖极限或生理极限下的血管系统的状态。

16. 根据权利要求15所述的计算机系统,其中

血管系统是患者的冠状动脉的至少一部分,并且  
所述一个或多个极值配置中的至少一个表示冠状动脉的至少所述部分的完全血运重建。

17. 根据权利要求15所述的计算机系统,其中所述一个或多个另外的配置进一步包括:  
基于所述一个或多个极值配置使用采样或求积方法所确定的一个或多个配置。

18. 根据权利要求13所述的计算机系统,其中  
所述多个血液流动仿真的结果是分别针对所述多个配置获得的第一仿真结果,  
所述多个配置中的每一个包括所述一个或多个第一参数的第一值,并且  
生成所述响应表面包括:  
针对所述多个配置中的每一个,确定所述一个或多个第二参数的第二值,第二值在被用于使用所述降阶模型执行的低保真度血液流动仿真中时产生与相应第一仿真结果匹配的相应第二仿真结果;以及

针对所述多个配置中的每一个,基于所述一个或多个第一参数的第一值以及所述一个或多个第二参数的所确定的第二值来生成所述响应表面。

19. 根据权利要求18所述的计算机系统,其中  
所述响应表面是拟合到点集合的表面,并且  
所述点集合中的每个点包括:针对所述多个配置中的相应配置而确定的一个或多个第二参数的所确定的值。

20. 一种存储指令的非暂时性计算机可读介质,所述指令在被一个或多个处理器执行时使得所述一个或多个处理器执行一种方法,所述方法包括:

使用血管血液流动的第一模型来执行多个血液流动仿真,所述多个血液流动仿真中的每一个对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的几何形状进行仿真;

基于所述多个血液流动仿真的结果,生成响应表面,所述响应表面将第一模型的一个或多个第一参数映射到血管血液流动的降阶模型的一个或多个第二参数,所述降阶模型具有比第一模型的保真度更低的保真度;

从表示血管系统的修改状态的参数值来确定由所述响应表面映射的降阶模型的一个或多个参数的值;以及

使用由所述一个或多个第二参数的所确定的值参数化的降阶模型来执行血管系统的修改状态中的血液流动的仿真,以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。

## 用于使用响应表面和降阶建模来估计血液流动的系统和方法

### [0001] 相关申请

本申请要求2019年5月17日提交的美国临时申请No.62/849,489的优先权,特此将所述美国临时申请的公开内容通过引用以其整体并入。

### 技术领域

[0002] 本公开的各种实施例总体上涉及使用响应表面和降阶建模来预测复杂系统的行为,并且特别地涉及使用响应表面方法技术和降阶建模来高效实时估计血液流动。

### 背景技术

[0003] 可以对现实世界的物理现象执行建模和仿真,以在没有侵入性测量的情况下预测结果。例如,许多现实世界物理现象(诸如,动脉中的血液流动、多孔介质中的流体流动、以及大的变形过程)可以使用偏微分方程来建模。建模和仿真也可以用于设计和优化系统,以产生期望的结果。

[0004] 在临床应用中,血液流动特性可能与评估患者的健康或疾病相关。例如,血液动力学指标可以用于评估病变的功能意义、血液灌注水平、血液凝块的输送、动脉瘤的存在、以及其他健康和疾病特性。血液动力学指标可以侵入性地测量或者使用血液流动仿真来评估。虽然仿真技术可以用于执行血液动力学的非侵入性评估(例如,基于可用的成像数据),但是仿真技术还可以提供响应于各种事件(例如,病变的进展或消退)对血液动力学的预测性建模、以及对所规划的程序(例如,外科手术介入)的结果的预测性建模的潜在益处。为了使预测性建模具有现实性或在临床上有用,建模和仿真系统能够与求解高保真度模型所需的平均时间相比显著更快地计算出结果可能是合期望的或者甚至是必要的。

[0005] 仿真结果的快速计算(诸如,实时仿真)可以辅助临床医生和其他人规划临床程序以及预测潜在未来事件的影响。在某些上下文中,使用仿真进行的这种预测可以不具有侵入性模拟。因此,在没有仿真结果的益处的情况下,临床医生在为患者规划程序时可能取而代之地需要仅依赖于可用数据、以及他或她的知识、直觉和经验。

[0006] 因此,需要用于使用血液流动和其他物理现象的模型来有效地执行实时仿真的系统和方法。由于准确度和效率可能是合期望的因素,因此特别地需要能够将准确建模与高效算法集成以实现仿真结果的实时估计的系统和方法。

[0007] 在各个方面,本公开针对解决这些上述挑战中的一个或多个。本文中提供的背景描述是出于总体地呈现本公开的上下文的目的。除非本文中另行指示,否则本部分中描述的材料对于本申请中的权利要求来说不是现有技术,并且不因包含在本部分中而被承认是现有技术或现有技术的启示。

### 发明内容

[0008] 根据本公开的某些方面,公开了用于血液流动仿真的系统和方法。

[0009] 例如,一种计算机实现方法可以包括:使用血管血液流动的第一模型来执行多个

血液流动仿真,所述多个血液流动仿真中的每一个对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的几何形状进行仿真;基于所述多个血液流动仿真的结果,生成响应表面,所述响应表面将第一模型的一个或多个第一参数映射到血管血液流动的降阶模型的一个或多个第二参数,所述降阶模型具有比第一模型的保真度更低的保真度;从表示血管系统的修改状态的参数值来确定由所述响应表面映射的降阶模型的一个或多个参数的值;以及使用由所述一个或多个第二参数的所确定的值参数化的降阶模型来执行血管系统的修改状态中的血液流动的仿真,以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。

[0010] 此外,一种系统可以包括存储指令的存储器;以及被配置成执行指令以执行一种方法的一个或多个处理器。所述方法可以包括:使用血管血液流动的第一模型来执行多个血液流动仿真,所述多个血液流动仿真中的每一个对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的几何形状进行仿真;基于所述多个血液流动仿真的结果,生成响应表面,所述响应表面将第一模型的一个或多个第一参数映射到血管血液流动的降阶模型的一个或多个第二参数,所述降阶模型具有比第一模型的保真度更低的保真度;从表示血管系统的修改状态的参数值来确定由所述响应表面映射的降阶模型的一个或多个参数的值;以及使用由所述一个或多个第二参数的所确定的值参数化的降阶模型来执行血管系统的修改状态中的血液流动的仿真,以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。

[0011] 此外,一种存储指令的非暂时性计算机可读介质,所述指令在被一个或多个处理器执行时使得所述一个或多个处理器执行一种方法。所述方法可以包括:使用血管血液流动的第一模型来执行多个血液流动仿真,所述多个血液流动仿真中的每一个对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的几何形状进行仿真;基于所述多个血液流动仿真的结果,生成响应表面,所述响应表面将第一模型的一个或多个第一参数映射到血管血液流动的降阶模型的一个或多个第二参数,所述降阶模型具有比第一模型的保真度更低的保真度;从表示血管系统的修改状态的参数值来确定由所述响应表面映射的降阶模型的一个或多个参数的值;以及使用由所述一个或多个第二参数的所确定的值参数化的降阶模型来执行血管系统的修改状态中的血液流动的仿真,以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。

[0012] 所公开的实施例的附加目的和优点将部分地在下面的描述中阐述,并且部分地将从该描述中变得清楚,或者可以通过实践所公开的实施例而学习到。所公开的实施例的目的和优点将借助于在所附权利要求中特别指出的元件和组合来实现和获得。

[0013] 要理解的是,前述一般描述和以下详细描述两者仅仅是示例性和解释性的,而不是对所要求保护的所公开实施例的局限。

## 附图说明

[0014] 被并入本说明书中并且构成其一部分的附图图示了各种示例性实施例,并且与本描述一起用于解释所公开的实施例的原理。

[0015] 图1描绘了根据一个或多个实施例的用于使用响应表面来估计系统行为的方法的流程图。

[0016] 图2A图示了根据一个或多个实施例的基于高保真度仿真来生成响应表面的方法。

[0017] 图2B图示了根据一个或多个实施例的用于基于使用图2A图示的方法所生成的响

应表面来实时预测仿真结果的方法。

[0018] 图3是图示了根据一个或多个实施例的用于对改变的管腔几何形状和边界条件对血液流动仿真的影响进行建模的方法的流程图。

[0019] 图4是图示了根据一个或多个实施例的用于对冠状动脉的血运重建的影响进行建模的方法的流程图。

[0020] 图5-6图示了根据一个或多个实施例的图4的方法的示例性实现方式。

[0021] 图7图示了根据一个或多个实施例的其中可以实现用于执行本公开的方法的计算机系统的环境。

### 具体实施方式

[0022] 在各种实施例中,系统和方法准许从计算流体动力学(CFD)导出的降阶模型被用于以与高保真度模型的准确度相比任意的准确度来实时地对复杂系统进行仿真。物理系统的高保真度模型可能在计算上是昂贵的。因此,高保真度模型可能对于实时仿真而言是不合适或不切实际的。在另一方面,降阶模型可以具有比高保真度模型的计算复杂度更低的计算复杂度。因此,降阶模型可以被更快地执行,从而更适合于实时仿真。

[0023] 为了将降阶模型用于实时仿真,同时实现任意准确度,可以针对某个配置集合来执行使用高保真度模型的高保真度仿真。然后,可以使用高保真度仿真的结果来对降阶模型进行参数化。如下面将更详细地描述的那样,可以使用根据本公开的响应表面方法技术来对降阶模型进行参数化。在该方法技术中,针对上述配置集合执行的高保真度仿真的结果可以用于生成响应表面,该响应表面可以是高保真度模型参数到降阶模型的映射。然后,可以将该响应表面用于对降阶模型进行参数化。

[0024] 使用参数化降阶模型的仿真(其可以是实时仿真)可能能够比使用高保真度模型的高保真度仿真显著更快地预测结果,同时实现任意地接近于高保真度仿真准确度的准确度。降阶模型的准确度、以及因此使用降阶模型的仿真的准确度可以取决于用于生成响应表面的配置集合。因此,可以通过增加或以其他方式调节用于生成响应表面的配置来调整降阶模型和降阶建模的准确度。例如,通过完善响应表面,有可能确保使用降阶模型的仿真具有某个误差容限内的准确度。附加地,由于用于生成响应表面的高保真度仿真可能在计算上是昂贵的,因此可以在使用降阶模型执行实时仿真之前离线地执行高保真度仿真。

[0025] 本公开的方法可以使得能够快速预测复杂系统的行为,诸如响应于患者状态改变的血液动力学改变。患者状态的这种改变可以是自然的或经规划的(例如,程序性的)。例如,在一些实施例中,本公开的方法可以用于响应于血管管腔几何形状的改变而产生FFRCT的实时更新。血管管腔几何形状的该改变可以例如是自然改变,或者是预期作为候选治疗的结果而发生的改变。

[0026] 在以下描述中,将参考附图更详细地描述本公开的实施例。下面使用的术语可以以其最广泛合理的方式来解释,即使它是结合本公开的某些特定示例的详细描述来使用的。事实上,甚至可以在下面强调某些术语;然而,意图以任何局限方式解释的任何术语都将在本具体实施方式部分中被明确且具体地如此定义。前述一般描述和以下详细描述两者仅仅是示例性和解释性的,而不是对所要求保护的特征的局限。

[0027] 在本公开中,术语“基于”意指“至少部分地基于”。单数形式“一”、“一个”和“该”包

括复数指代物,除非上下文另行规定。术语“示例性”是以“示例”而非“理想”的意义来使用的。术语“包括”、“包括有”、“包含”、“包含有”或者其他变型意图覆盖非排他性的包含,使得包括元素列表的过程、方法或产品不一定仅包括那些元素,而是可以包括未明确列出的、或对于这种过程、方法、制品或装置固有的其他元素。相对术语(诸如,“基本上”和“总体上”)用于指示所陈述的值或理解值的 $\pm 10\%$ 的可能变化。

[0028] 在本公开中,降阶模型也可以被称为低保真度模型或快速模型。可用于实时仿真的降阶模型也可以被称为实时模型。此外,在上下文准许的情况下,降阶模型和高保真度模型可以是一般模型,该一般模型可以使用不同的参数值(诸如,对应于不同配置的不同值)来参数化。一般而言,术语“参数”可以指代任何类型的参数,包括边界条件。

[0029] 在以下描述中,提供了一种用于偏微分方程的快速仿真的方法技术。初始地,要注意的是,出于构建和参数化用于快速预测复杂系统行为的降阶模型的目的,可以假设以下内容:(i)存在针对所考虑的系统执行良好的高保真度模型;(ii)与高保真度仿真相关的信息(例如,患者几何形状的原始状态和患者的生理状态)是可用的;以及(iii)基于(i)和(ii)中的信息来执行离线计算是可能的,其中离线计算可能不如使用降阶方法进行求解那么快。然而,要理解的是,可以独立于前述假设来实践本公开的方法,并且这里呈现的假设仅用于说明性目的。

[0030] 令一般偏微分方程具有如下形式:

$$L(u; p)u(x^N) = 0 \text{ 在 } \varphi \text{ 中} \quad (1)$$

其具有边界条件:

$$b(u; p) = 0 \text{ 在 } \varphi^B \text{ 中} \quad (2)$$

其中 $L$ 是运算符(例如,微分、积分、函数或其组合), $u$ 是未知数, $x^N$ 表示问题维度, $p$ 表示给定参数, $\varphi$ 是问题域,并且 $\varphi^B$ 标示域的边界。表达式(1)和(2)可以表示一系统,并且可以用作该系统的高保真度模型。

[0031] 该偏微分方程的降阶模型可以使用更简单的运算符(例如,常微分方程)来近似运算符 $L$ ,将维数 $x^N$ 降低到降阶模型的输入空间 $x^n$ ——在该输入空间中,对仿真结果的观察是感兴趣的,和/或将参数集合 $p$ 简化为 $\hat{p}$ 。降阶模型可以被表达如下:

$$\tilde{L}(\hat{u}; \hat{p})\hat{u}(x^n) = 0 \text{ 在 } \varphi \text{ 中} \quad (3)$$

其具有边界条件:

$$\hat{b}(\hat{u}; \hat{p}) = 0 \text{ 在 } \hat{\varphi}^B \text{ 中} \quad (4)$$

目标是使 $\hat{u}(x^n)$ 成为对 $u(x^N)$ 的合理近似,其中 $x^n$ 可以是 $x^N$ 的超集。一般的方法是执行对该系统的仿真,如原始由表达式(1)和(2)针对各种边界域 $\varphi^B$ 、边界条件 $b(\cdot)$ 和(一个或多个)参数所公式化的那样,使得可以使用响应表面来生成对该问题的准确近似。对该系统的这种仿真可以被称为高保真度仿真。

[0032] 出于生成响应表面的目的,域 $\varphi^B$ 可以具有如下表达的界限:

$$\varphi_L^B \leq \varphi^B \leq \varphi_U^B \quad (5)$$

该系统将受制于的边界条件可以具有如下表达的界限:

$$b_L(u) \leq b(u) \leq b_U(u) \quad \forall u \quad (6)$$

此外,参数空间可以具有如下表达的界限:

$$p_L(u) \leq p \leq p_U(u) \quad \forall u \quad (7)$$

可以用一系列的域和边界条件来求解原始控制方程 (governing equation):

$$(b_1(\cdot), \varphi_1^B, p_1), (b_2(\cdot), \varphi_2^B, p_2), \dots (b_M(\cdot), \varphi_M^B, p_M) \quad (8)$$

其中M是所执行的高保真度仿真的数量。上面表达的M个项中的每一个可以对应于要针对其执行高保真度仿真的配置。也就是说,这M个项可以表示M个配置。

[0033] 一般而言,“配置”可以指代任何建模或仿真配置,并且可以包括任何参数(及其值)。配置可以是(一个或多个)这种参数的(一个或多个)值的集合。在前述公式中,这M个配置中的每一个可以被表示为针对 $b(\cdot)$ 、 $\varphi^B$ 和/或 $p$ 的参数值集合。由特定配置表示的概念可以取决于正在被建模的系统。例如,如果该系统是通过患者动脉的血液流动,则配置可以表示某个管腔几何形状、患者的某个生理状态或其组合。

[0034] 一般而言,在选择这M个配置时,可以使用任何合适的方法,诸如采样方法或求积方法。针对这M个配置的高保真度仿真的结果可以被表达为:

$$u_1, u_2, \dots u_M \quad (9)$$

响应表面 $R$ 可以是高保真度模型的参数到降阶模型的映射:

$$\hat{p} \sim R(p, b(\cdot), \varphi^B) \quad (10)$$

其中 $\hat{p}$ 可以捕获原始方程的复杂度,从而使得 $\hat{L}$ 能够成为与 $L$ 相比不太复杂的运算符。可以通过任何合适的方法来获得响应表面 $R$ 。如果 $R$ 使用点拟合多项式,诸如拉格朗日多项式,则可以构造降阶模型,使得在已经针对其执行了高保真度仿真的M个配置下, $\hat{u}(x^n) \equiv u(x^n)$ 。也就是说,可以构建降阶模型,以确切地匹配这M个配置的高保真度模型的输出。该方法允许计算机更快地求解如下问题:

$$\hat{L}\hat{u}(x^n) = 0 \quad (11)$$

同时确保了在这M个配置下,结果是等同的。对于较大的M而言,针对中间配置下的高保真度结果的近似一般将会更好,但是对于离线计算所需的时间也将是如此。

[0035] 一般而言,高保真度模型可以包括任何数量的数学关系。因此,高保真度模型可以包括由上述表达式(1)给出的形式的多个不同数学关系,并且可以包括其他数学关系。类似地,降阶可以具有多个数学关系,并且可以具有由上述表达式(3)给出的形式的多个不同数学关系。一般而言,高保真度仿真可以利用关于所讨论的系统的所有可用信息(例如,完整的空间和时间表示),并且用于仿真的高保真度模型可以包括任何数量的全阶控制方程。

[0036] 响应表面(诸如,响应表面 $R$ )可以是一个或多个感兴趣的量或参数与底层变量之间的数学关系。响应表面可以是(一个或多个)输入变量(例如,高保真度模型的参数)映射到输出变量(例如,降阶模型的参数)的函数(例如,拟合函数)。可以使得响应表面使用降阶模型探索参数空间的方式来构建响应表面。取决于应用或实现方式,可能存在多个响应表面。不同的响应表面可以在高保真度与降阶模型的不同相应参数之间进行映射。

[0037] 图1是图示了根据一个或多个实施例的用于使用响应表面来估计系统行为的方法的流程图。

[0038] 步骤101可以包括:使用系统的第一模型来执行多个仿真。第一模型可以是如本公开中所描述的高保真度模型。

[0039] 在一些实施例中,第一模型可以是血管血液流动的高保真度模型,并且仿真可以是血液仿真,该血液仿真对患者的血管系统中的血液流动或基于患者的血管系统的血管几何形状(例如,基于患者的血管系统所确定的导出的血管系统)进行仿真。术语“患者的血管系统”可以指代患者身体的任何部分中的血管系统。血管系统的示例包括但不限于:冠状血管系统、外周血管系统、脑血管系统、肾血管系统、内脏血管系统和肝血管系统(诸如,门静脉)。导出的血管系统可以是例如已经经历了对患者血管系统的假设性修改的假设性血管系统。

[0040] 虽然在本公开中描述了关于血液流动的各种实施例,但是本公开不限于对血液流动的仿真。一般而言,本公开中描述的公式和技术(包括针对血液流动仿真描述的那些)可以应用于或推广到其他复杂系统,包括可以使用计算流体动力学来表征的系统。

[0041] 步骤102可以包括:基于从步骤101获得的仿真结果来生成响应表面,该响应表面将第一模型的(一个或多个)参数映射到第二模型的(一个或多个)参数,第二模型具有比第一模型的保真度更低的保真度。第二模型可以是具有比第一模型的保真度更低的保真度的模型,诸如本公开中所描述的降阶模型。如上所描述,由于第一模型和第二模型可以分别是高保真度模型和降阶模型,因此响应表面可以是高保真度模型的(一个或多个)参数到降阶模型的(一个或多个)参数的映射。该映射可以是函数,其输出是降阶模型的(一个或多个)参数的值,并且其输入是高保真度模型的(一个或多个)参数的值。

[0042] 步骤103可以包括:从要分析的配置的参数值来确定由该响应表面映射的第二模型的(一个或多个)参数的值。要分析的配置的参数值可以是第一模型的(一个或多个)上述参数的值。在一些实施例中,第一模型可以是微分方程集合。因此,要分析的配置的参数值可以是在这种微分方程中使用的参数(包括边界条件)的值。(一个或多个)第二参数的值可以作为要分析的配置的参数值的函数由该响应表面来确定。

[0043] 步骤104可以包括:使用由第二模型的(一个或多个)参数的所确定值参数化的第二模型来执行仿真。例如,在关于血液流动仿真的上述实施例中,步骤103中的要分析的配置的参数值可以表示患者的血管系统的修改状态(例如,修改的解剖和/或生理状态),在这种情况下,步骤104可以确定血管系统的修改状态的血液流动特性。仿真可以实时执行。血液流动特性可以是血流储备分数(FFR)、血流量值、血流方向,

图2A图示了基于高保真度仿真来生成响应表面的方法。图2A的方法图示了图1的方法的对应于步骤101和102的部分的示例实现方式。

[0044] 步骤201可以包括:接收指示配置的信息。指示配置的信息可以包括例如一个或多个几何形状(例如,其中流体流动将被建模或仿真的几何形状)、一个或多个边界条件、和/或可以是配置的一部分的任何其他参数。在一些实施例中,指示配置的信息可以指示可能配置的范围,在这种情况下,在步骤201中接收到的信息可以指示上述参数的值的范围。在步骤201中接收到的信息可以由用户手动输入,或者由在计算机系统上执行的过程自动确定。

[0045] 步骤202可以包括:标识高保真度仿真的配置220。可以基于在步骤201中接收到的信息来标识配置220。例如,如果在步骤201中接收到的信息指示配置的范围,则在步骤202中标识的配置220可以是配置范围内的配置的样本。下面结合图3的方法讨论了采样和求积方法的示例。可以自动标识配置220,或者基于用户输入来标识配置220。

[0046] 步骤203可以包括:针对高保真度仿真的所标识的配置执行高保真度仿真。在步骤202中标识的配置220可以被输入到高保真度模型中,并且可以使用根据配置220中指定的参数值所参数化的高保真度模型来执行高保真度仿真。

[0047] 步骤204可以包括:导出降阶模型的参数。在步骤204中导出的参数可以基于在步骤202中标识的配置220和使用高保真度模型执行的高保真度仿真的结果来导出。

[0048] 步骤205可以包括:生成响应表面224。如上所描述,响应表面可以是高保真度模型的参数到降阶模型的映射。使用高保真度模型和降阶模型的参数的仿真的结果可以定义高保真度模型的参数值与降阶模型的参数值之间的对应关系。这种对应关系可以被表示为点222的集合。然后,可以基于点222的集合来生成响应表面224。例如,响应表面224可以是拟合到点222的表面。响应表面可以具有确切的拟合,这是因为表面224包括所有的点222(与所有的点222相交),如图2A中所图示。然而,这样并不是要求。表面224是否包括所有的点222可以取决于表面224的函数形式。如上所指出,拉格朗日多项式可以用于确切拟合。在其他拟合方法中,对于表面224而言,有可能仅包括点223的一部分、或者不包括任何点223。

[0049] 例如,在步骤204中导出的降阶模型的参数可以是参数值集合,当在使用降阶模型的仿真中使用时,其产生了如降阶模型所计算的、与高保真度仿真的相同结果相同的结果。例如,如果高保真度仿真的N个配置指定了  $(b_1(\cdot), \varphi_1^B, p_1), (b_2(\cdot), \varphi_2^B, p_2), \dots (b_N(\cdot), \varphi_N^B, p_N)$  的相应参数值,并且这种参数值在高保真度仿真中产生了  $u_1, u_2, \dots u_N$  的结果,则在步骤204中导出的参数值可以是  $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots \hat{p}_N$ , 使得  $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots \hat{p}_N$  在使用降阶模型的仿真中产生相同的结果  $u_1, u_2, \dots u_N$ 。因此,点222的集合可以被定义为

$(\hat{p}_1, (b_1(\cdot), \varphi_1^B, p_1)), (\hat{p}_2, (b_2(\cdot), \varphi_2^B, p_2)), \dots (\hat{p}_N, (b_N(\cdot), \varphi_N^B, p_N))$ , 并且响应表面224可以被生成为拟合到这些点的表面。因此,这种响应表面可以提供如上面结合表达式(10)所描述的映射关系。

[0050] 步骤206可以包括:评估响应表面224的准确度。步骤207可以基于在步骤206中评估的准确度来确定响应表面224是否要被完善以具有更高的准确度。

[0051] 响应表面的准确度可以通过任何合适的标准来定义。在一些实施例中,准确度可以是在复制高保真度仿真的结果方面的准确度的量度。例如,当使用响应表面224来针对一个或多个测试配置对降阶模型进行参数化时,准确度可以基于降阶建模的结果与针对那些一个或多个测试配置的高保真度仿真的结果的接近度。一个或多个测试配置可以包括不同于点222所表示的配置的一个或多个配置,响应表面224是基于点222而生成的。

[0052] 如果在步骤206中评估的响应表面224的准确度是不足的(例如,不满足预定义阈值条件),则步骤207可以解析为“是”,并且如果响应表面224的准确度被评估为足够的(例如,满足预定义阈值),则步骤207可以解析为“否”。在该上下文中,准确度可以例如指代针对任意定义的配置的降阶模型的准确度。

[0053] 如果步骤207解析为“是”(例如,准确度是不足的),则图2A中所示的方法可以前进

到步骤208,步骤208可以包括完善高保真度仿真的配置。完善配置的过程可以包括:添加高保真度仿真的新配置、移除现有配置、和/或调节现有配置的值。例如,如图2A中所示,可以将附加配置添加到原始标识的配置220,以改进响应表面224的准确度,从而获得经完善的配置集合220A。可以针对任何新添加的配置执行使用高保真度模型的仿真(步骤203),使得所得的响应表面224被更新。

[0054] 步骤207的决策可以实现重复的过程,其中在每个后续迭代中完善(例如,增加)高保真度仿真的配置,直到响应表面224达到足够的准确度为止。在步骤203中针对其执行高保真度仿真的每个配置可以结果得到对应的点222。因此,通过添加附加配置,可以增加点222的数量。然后,可以将响应表面224拟合到增加数量的点222,从而潜在地结果得到更好的准确度。

[0055] 当响应表面224达到足够的准确度时,步骤207可以解析为“否”,并且然后响应表面224可以被接受为最终响应表面224A。如图2中所示,最终响应表面224A的点222A(其也可以被称为控制点)可以比初始响应表面224的点222更多。最终响应表面224A还用作前述响应表面R的示例,在这种情况下,用于生成最终响应表面224A的配置集合将用作M个配置的前述集合的示例。

[0056] 取决于执行针对其执行了高保真度仿真的所有配置的高保真度仿真所花费的时间,图2A中所图示的方法可能在计算上是昂贵的。因此,该方法可以离线地执行。例如,最终响应表面224A可以在使用降阶模型的实时仿真之前生成。

[0057] 图2B图示了用于基于使用图2A的方法生成的响应表面224A来实时预测仿真结果的方法。图2B的方法图示了图1的方法的对应于步骤103和104的部分的示例实现方式。

[0058] 步骤241可以包括:接收要分析的配置。该配置可以通过任何合适的方法来定义。例如,该配置可以表示要经由降阶仿真来执行的某个实验的设置。在本公开中,术语“要分析的配置”和“要探索的配置”可互换地使用。

[0059] 步骤242可以包括:探测(probe)响应表面。探测过程可以针对要分析的配置来确定降阶模型的参数(例如,参数集合 $\hat{p}$ 中的参数)的值。使用点250来说明探测过程,点250表示针对要分析的配置的降阶模型的参数的值。如所示出,点250可以是从小于要分析的配置映射的点。例如,要分析的配置可以具有上面讨论的参数 $p$ 、 $b$ 和 $\varphi^B$ 的值,并且响应表面可以作为 $p$ 、 $b$ 和 $\varphi^B$ 的那些值的函数来确定 $\hat{p}$ 的值。也就是说,点250可以在响应表面224A上具有对应于 $\hat{p}$ 的上述值的位置, $p$ 、 $b$ 和 $\varphi^B$ 可以具有可以表示具有 $\hat{p}$ 的所确定值的位置。由于可以根据点224A的位置对响应表面224A上的位置进行内插,因此点250的位置可以在所内插的位置处。

[0060] 步骤243可以包括:使用由响应表面225给出的映射来求解降阶模型。步骤204可以包括求解如上所描述的表达式(11)。步骤242和243可以作为实时仿真的一部分来实时执行。

[0061] 步骤244可以包括:生成并报告仿真的结果。例如,结果可以被存储在电子存储设备中,或者呈现给用户(例如,显示在显示器上)。由于降阶模型的求解可能是实时过程,因此降阶模型的结果也可能是实时呈现的。

[0062] 因此,对复杂系统的行为的预测可以包括:如关于图2A所描述的生成响应表面的

第一过程、以及如上面关于图2B所描述的快速探测响应表面以估计针对特定配置的结果(例如,血液动力学指标)的第二过程。如上所指出,取决于使用高保真度模型执行高保真度仿真所花费的时间,构建响应表面的第一过程可以离线地执行,并且在计算上是昂贵的。其计算开销可以取决于针对第二过程的可接受误差。

[0063] 图3和图4图示了其中应用上面描述的技术的另外示例。图3是图示了用于对改变的管腔几何形状和边界条件对血液流动(例如,冠状动脉流动)仿真的影响进行建模的方法的流程图。该方法可以应用上面描述的各种技术来在给定的新配置下执行对动脉(例如,冠状动脉)中的血液流动的实时估计。在该上下文中,给定的新配置可以是例如患者的管腔几何形状和/或生理状态。图3的方法可以由任何合适的计算机系统来执行。

[0064] 步骤301可以包括:接收描述患者的血管系统的解剖信息。所描述的血管系统可以包括患者的感兴趣的所有动脉。在一些实施例中,血管系统可以是冠状血管系统,在这种情况下,解剖信息可以描述患者的冠状动脉。如上面结合图1所描述,其他类型的血管系统的示例包括但不限于:外周血管系统、脑血管系统、肾血管系统、内脏血管系统和肝血管系统(诸如,门静脉)。

[0065] 可以通过计算机网络从执行步骤301的计算机系统的存储器(例如,硬盘驱动器或其他电子存储设备)或从另一个计算机系统(例如,医生或第三方提供者的计算机系统)接收解剖信息。

[0066] 在一些实施例中,解剖信息可以包括使用成像或扫描模态获取的一个或多个图像、和/或从患者的这种图像中提取的(或以其他方式基于对这种图像的分析而获得的)信息。成像或扫描模态的示例包括:计算机断层摄影(CT)扫描、磁共振(MR)成像、微型计算机断层摄影( $\mu$ CT)扫描、微型磁共振( $\mu$ MR)成像、双能量计算机断层摄影扫描、超声成像、单光子发射计算机断层摄影(SPECT)扫描和正电子发射断层摄影(PET)扫描。患者的这种图像可以通过计算机网络从医生或第三方提供者来接收,和/或存储在执行步骤301的计算机系统的存储器中。由于图像描述了患者的特定解剖和生理特性,因此从这种图像或其他患者特定信息中导出或者基于这种图像或其他患者特定信息而构造的任何模型可以被认为是患者特定模型。要注意的是,术语“患者”的使用不意图是限制性的。“患者”一般可以被称为“人”。

[0067] 步骤302可以包括:基于在步骤301中接收到的解剖信息来生成血管系统的解剖模型。解剖模型可以具有任何合适的形式,并且可以对血管系统的任何合适的方面进行建模。例如,解剖模型可以描述如从解剖信息辨别的血管系统的血管的患者特定的三维几何形状。在一些实施例中,解剖模型可以指示疾病进展或消退、斑块破裂、血栓形成以及所表示的(一个或多个)血管系统的其他特性。血管系统的解剖模型也可以被称为患者特定解剖模型或患者特定的血管模型。在一些实施例中,解剖模型可以对患者的一个或多个生理状态下的血管系统的特性进行建模。在这种实施例中,当患者处于某个生理状态(例如,静息状态或锻炼状态)中时,解剖模型的特性可以反映血管系统的特性。

[0068] 用于生成解剖模型的方法的示例在例如Taylor的US 2012/0041739 A1(“US ‘739”)中被描述,特此将该专利通过引用以其整体并入。要注意的是,US ‘739还提供了在本公开中讨论的其他方面的示例,诸如降阶模型和血流储备分数(FFR)的计算。

[0069] 步骤301和302可以由执行下面描述的剩余步骤304至307的相同计算机系统来执

行。然而,也可能的是步骤301和302由另一个计算机系统来执行,在这种情况下,通过通信网络将解剖模型提供给执行剩余步骤的计算机系统。通过通信网络接收到的任何解剖模型可以被存储在计算机系统的存储器中。

[0070] 步骤303可以包括:基于在步骤302中生成的解剖模型来执行高保真度仿真。仿真可以是血液流动仿真,该血液流动仿真对由解剖模型所建模的动脉中的血液流动进行仿真。高保真度仿真可以涉及描述了该系统的(一个或多个)详细数学关系。这种数学关系可以包括以任何合适公式的(一个或多个)偏微分方程,诸如纳维叶-斯托克斯(Navier-Stokes)方程。可以使用(一个或多个)任何合适的技术来执行高保真度仿真,这些技术诸如有限元分析、有限差分方法、格子玻尔兹曼方法等。高保真度仿真中使用的详细数学关系可以构成高保真度模型,该模型被执行以执行高保真度仿真。

[0071] 例如,详细数学关系可以包括具有边界条件和/或从解剖模型中导出的其他参数的纳维叶-斯托克斯方程。边界条件和/或其他参数可以例如表示由解剖模型所建模的动脉的几何形状或其他特性。

[0072] 步骤304可以包括:对要探索的配置的极值执行高保真度仿真。这种仿真可以是血液流动仿真,该血液流动仿真对要探索的配置的极值所表示的结构中的血液流动进行仿真。

[0073] 在该上下文中,要探索的配置可以是意图使用下面描述的降阶仿真来探索(例如,仿真或以其他方式研究)的任何配置。要探索的配置的极值可以取决于能够使用降阶模型来探索的参数空间和域的极值。可以基于探索的极限来施加界限。这种界限可以是应用特定的。要注意的是,如上所描述,要探索的配置的极值可以是出于生成响应表面的目的的配置,并且也可以被称为极值配置。

[0074] 在一些实施例中,可以基于解剖极限来施加一个或多个界限。例如,关于解剖模型的上界限可以基于患者特定模型的最大容许扩张(dilation)来施加。在该情况下,患者特定模型可以对各种位置处的管腔变窄(lumen narrowing)的减轻、应用较高水平硝酸盐的影响或其组合进行建模。在这种治疗情形下的最大容许扩张可以被表示为关于解剖模型的上界限。在一些实施例中,基于解剖极限所施加的一个或多个界限可以表示血管的添加或移除。例如,在旁路移植物(bypass graft)的情况下,上界限可以是基于可用移植物的吻合(anastomose)的最大数量。

[0075] 附加地或替代地,可以基于生理极限来施加一个或多个界限。例如,为了评估患者的不同生理状态,可以基于静息状态和锻炼条件或基于边界条件的其他极值来评估上界限和/或下界限。例如,上(或下)界限可以表示患者的静息状态,并且下(或上)界限可以表示患者的锻炼状态。

[0076] 步骤305可以包括:标识要针对其执行高保真度仿真的一个或多个配置;以及对一个或多个所标识的配置执行高保真度仿真。要注意的是,步骤305服务于上面结合图2A的方法讨论的步骤202和203的示例。

[0077] 参数集合和域越大,响应表面的准确度和实时预测的准确度就越好。可以使用任何采样或求积方法来标识一个或多个配置,这些方法包括(但不限于):蒙特-卡罗采样方法、拉丁超立方体采样方法、高斯求积方法、稀疏网格求积方法、自适应稀疏网格求积方法以及其组合。蒙特-卡罗采样可能在对大维度参数空间进行采样方面是适当的,但是对于具

有中等维度参数空间的问题可能收敛得非常慢。拉丁超立方体采样可以实现参数空间的分离,并且对于中等维度参数空间可以比蒙特-卡罗更好地收敛。在高斯求积方法中,高斯点可以用于生成配置,并且张量积内插可以用于将点缩放到更高维度。稀疏网格求积方法可能对于一维而言与高斯求积方法相同,但是可以具有更稀疏的网格来减少仿真次数。自适应稀疏网格求积方法可能与稀疏网格求积相同,但是可以适配于函数,使得浅变化区域与显著变化区域相比被更少地探索。

[0078] 在标识出要对其执行高保真度仿真的一个或多个配置之后,步骤305可以进一步包括:对一个或多个所标识的配置执行高保真度仿真。

[0079] 步骤306可以包括:基于高保真度仿真的解来生成响应表面。如上所描述,可以使用任何函数形式、基于多个配置(例如,M个配置)下的高保真度解来创建响应表面。在图3的上下文中,前述讨论中提到的M个配置可以包括在步骤305中标识的任何配置,并且还可以包括在步骤303和/或步骤304中仿真的任何配置。可以执行局部线性内插或拉格朗日多项式内插,以确保控制点处的实时仿真的解与完全仿真的解相匹配。一般而言,步骤306可以利用上面结合图2A的步骤204、205、206和208描述的任何技术。

[0080] 在一些实施例中,可以生成多个响应表面。例如,如果高保真度仿真涉及多个数学关系(例如,以表达式(1)形式的数学关系)和/或降阶模型包括多个数学关系(例如,以表达式(3)形式的数学关系),则可以生成多个响应表面以在高保真度与降阶数学关系的不同组合之间进行映射。此外,可以通过完善用于生成响应表面的配置来修正步骤306的响应表面,如上面结合图1所描述的那样。

[0081] 步骤307可以包括:基于响应表面来执行降阶仿真。降阶仿真可以通过由响应表面估计的内插值而被告知。例如,如上面结合图2B所描述,可以基于要探索的一个或多个配置来探测响应表面,以获得内插值。要探索的一个或多个配置可以取决于该方法的应用。

[0082] 降阶仿真可以使用降阶模型来执行,该降阶模型可以被构造成确切地匹配针对其中执行了高保真度仿真的M个配置的高保真度模型的输出。降阶仿真可以实时执行。

[0083] 图3的方法可以包括下面描述的附加示例性方面中的任何一个或多个,所有这些方面都是可选的。这些方面可以被实现成上面描述的方法的一个或多个步骤,或者被实现为该方法的附加步骤。

[0084] 在一些示例中,图3的方法可以包括:量化置信区间。例如,在步骤306中创建的响应表面可以被探测以运行许多仿真,由此可以计算针对未知领域的置信区间估计。出于量化置信区间的目的,要探索的配置可以包括适合于量化置信区间的任何配置。例如,配置可以代表意图对其执行降阶建模的配置。置信区间估计可以例如用于辅助执行降阶仿真的临床医生理解降阶模型在执行类似类型仿真时的准确度。替代地,置信区间估计可以用于修正在步骤306中生成的响应表面。

[0085] 在一些示例中,图3的方法可以包括:对疾病进展和/或消退进行建模。例如,在步骤306中生成的响应表面还可以被探测,以预测可能进展或消退的病变的影响。进而,这些可以用于患者管理和监测。要探索的配置可以包括适合于对疾病进展和/或消退进行建模或仿真的任何配置。

[0086] 在一些示例中,图3的方法可以包括:对不同的生理条件进行建模。例如,在步骤306中生成的响应表面还可以被探测,以对不同的生理条件(例如,静息和锻炼条件)或药剂

的影响进行建模。要探索的配置可以包括适合于对物理条件进行建模或仿真的任何配置。

[0087] 虽然已经针对与血液流动有关的某些应用描述了图3的方法,但是针对图3的方法描述的技术可以应用于其他复杂系统,包括其他流体动力学系统。

[0088] 图4是图示了用于对冠状动脉的血运重建的影响进行建模的方法的流程图。该方法可以应用上面描述的各种技术来执行冠状动脉的血运重建对血液流动的影响的实时计算。图5-6图示了图4的方法的示例性实现方式,这些实现方式也在下面讨论。图4-6的方法可以由任何合适的计算机系统来执行。

[0089] 步骤401可以包括:接收描述患者的冠状动脉的解剖信息。步骤401可以包括上面描述的步骤301的任何方面。在一些实施例中,步骤401可以包括:接收从冠状动脉CT扫描的分析获得的解剖信息。例如,如图5中所示,可以从取得的患者CCTA图像502中提取描述患者的解剖特性(诸如,血管中心线和管腔)的解剖信息。

[0090] 步骤402可以包括:生成患者模型,患者模型可以包括基础患者模型和经修改的患者模型。可以基于在步骤401中接收到的解剖信息来生成基础患者模型。经修改的患者模型可以是对基础患者模型的修改。在一些实施例中,患者的冠状动脉可以具有变窄的管腔,并且经修改的患者模型可以表示冠状动脉的完全血运重建。

[0091] 基础患者模型可以是对患者冠状动脉的如解剖信息所描述的实际解剖特性(例如,血管中心线和管腔)进行建模的解剖模型。例如,如图5中所示,可以基于从CCTA图像502中提取的血管中心线和管腔来生成基础患者模型503。在图5中,基础患者模型503被图示为在模型的各个位置503A、503B和503C处具有变窄的几何形状。变窄的几何形状可以对例如患者冠状动脉的对应位置处的狭窄进行建模。

[0092] 经修改的患者模型可以是已经被修改成对患者冠状动脉特性的改变进行建模的基础患者模型。例如,经修改的患者模型可以对患者冠状动脉的假设性条件进行建模。这种条件可以是例如对应于要探索的配置的极值的理想化条件,在这种情况下,经修改的患者模型可以被称为理想化模型。在图5中,理想化模型504是经修改的患者模型的示例,该模型在由基础患者模型表示的整个解剖结构被血运重建的条件下对冠状动脉进行建模。例如,如图5中所示,理想化模型504未指示基础患者模型503的位置503A、503B和503C处的狭窄。在这种实施例中,经修改的患者模型可以是经血运重建的解剖模型。

[0093] 步骤403可以包括:使用基于患者模型所获得的边界条件来执行对血液流动的高保真度仿真,以仿真腺苷对于充血(hyperemia)的影响并且获得第一高保真度解。一般而言,步骤403中的边界条件是从患者的特性中导出的边界条件,患者的特性诸如患者的解剖结构、心肌、用于静息血液流动的标度定律(scaling law)。这种边界条件可以包括基于患者模型而获得的(例如,从患者模型中导出的)边界条件。然而,本公开不限于此,并且也可能的一些或所有边界条件是从其他模型或信息中导出的。

[0094] 步骤403的高保真度仿真可以通过构造以高保真度模型形式的计算模型来执行。计算模型可以包括数学关系(诸如,纳维叶-斯托克斯方程)、以及从患者的解剖结构、心肌、用于静息血液流动的标度定律中导出的边界条件。这种边界条件可以仿真腺苷对于充血的影响。因此,为了执行高保真度仿真,执行步骤403的计算机系统可以使用上述边界条件在冠状动脉上求解纳维叶-斯托克斯方程。

[0095] 步骤404可以包括:使用基于经修改的患者模型所获得的边界条件来执行对血液

流动的高保真度仿真,以获得第二高保真度解。一般而言,步骤404的高保真度仿真可以在对应于其中冠状动脉被完全血运重建的(一个或多个)配置的极值上执行。这种极值用作上面结合图3的步骤304描述的要探索的配置的极值的示例。血运重建可以是其中对患者特定的几何形状的整个解剖结构进行血运重建的血运重建。步骤404的高保真度仿真可以使用被构造为高保真度模型的计算模型来执行,该计算模型可以包括从上面描述的经修改的患者模型中导出的边界条件。步骤403的计算模型和步骤404的计算模型可以基于相同的数学关系,但是具有所应用的不同边界条件和/或其他参数。

[0096] 步骤405可以包括:针对基础患者模型和经修改的患者模型中的每一个,在不同流动速率下执行对血液流动的附加高保真度仿真,以获得第三和第四高保真度解。例如,在步骤402中执行的高保真度仿真可以针对第一流动速率来执行,并且步骤405可以包括以相同或基本相同的方式(例如,使用基于基础患者模型的边界条件)来执行的高保真度仿真,但是具有比前述第一流动速率更高(例如,高10%、15%、25%、50%或75%)的流动速率。类似地,在步骤403中执行的高保真度仿真可以针对第二流动速率(其可以与第一流动速率相同)来执行,并且步骤405可以包括以相同或基本相同的方式(例如,使用基于经修改的患者模型的边界条件)来执行的高保真度仿真,但是具有比前述第二流动速率更高(例如,高10%、15%、25%、50%或75%)的流动速率。通过在不同流动速率下执行附加仿真,跨步骤403-405获得的高保真度解可以用于对降阶模型进行告知,其中流体阻力参数取决于流动速率。在分别与基础患者模型和经修改的患者模型相关联的每一个配置中的一个附加仿真的情况下,降阶模型中的流体阻力可以线性地取决于流速。

[0097] 步骤406可以包括:分别针对流体阻力函数的截距和斜率来生成响应表面。响应表面可以基于跨步骤403-405获得的四个高保真度解来生成,并且可以包括两个响应表面,即针对流体阻力函数的截距的第一响应表面和针对流体阻力函数的斜率的第二响应表面。第一和第二响应表面两者都可以基于一维纳维叶-斯托克斯方程。第一响应表面可以具有针对截距的函数形式 $1/r^4$ 。第二响应表面可以具有针对斜率的函数形式 $(dA/dz * 1/r^6)$ 。在这些表达式中, $r$ 是局部半径, $A$ 是面积,并且 $dA/dz$ 是沿血管的面积梯度。要注意的是,步骤406是上面描述的步骤306的示例。因此,结合步骤306描述的任何技术都适用于步骤406。

[0098] 步骤407可以包括:接收修改的几何形状。修改的几何形状可以是经受降阶仿真的几何形状,并且可以是经血运重建的几何形状,包括例如冠状动脉将在其处被血运重建的位置、以及(一个或多个)血管管腔的(一个或多个)最终大小。经血运重建的几何形状可以由用户输入或由仿真过程定义的仿真输入。用于降阶建模和仿真的一个或多个配置可以基于经血运重建的几何形状来定义。例如,血管化几何形状的属性的值(诸如,血运重建的位置的值和/或血管管腔的最终大小的值)可以用作配置或配置的一部分。这种配置可以在(一个或多个)响应表面上使用,以获得在下面描述的步骤408中使用的(一个或多个)降阶模型的参数。

[0099] 步骤408可以包括:基于经血运重建的几何形状和两个响应表面来执行降阶仿真。降阶仿真可以由使用经血运重建的几何形状上的响应表面所估计的内插值而被告知。降阶仿真可以实时执行,并且可以使用如上所描述的那样构造的一个或多个降阶模型。这种降阶模型可以具有以表达式(3)和(4)形式的数学关系,并且可以被这样构造以产生与过程510的高保真度模型针对四个高保真度相同的结果。要注意的是,步骤408是上面描述的步

骤307的示例。因此,结合步骤307描述的技术一般适用于步骤408。

[0100] 针对步骤403中的配置,低保真度仿真的输出可以用于输出更新的流速、血压、FFR或任何其他感兴趣的量,诸如壁面剪切应力。

[0101] 在图5的图示中,过程510用作步骤403至405的高保真度仿真的示例。如图5中所示,可以执行四次纳维叶-斯托克斯仿真。这些仿真可以包括使用基于理想化模型504应用的充血(hyperemic)边界条件的第一纳维叶-斯托克斯仿真、使用基于理想化模型504应用的超充血(superemic)边界条件的第二纳维叶-斯托克斯仿真、使用基于基础患者模型503应用的超充血边界条件的第三纳维叶-斯托克斯仿真、以及使用基于基础患者模型503应用的充血边界条件的第四纳维叶-斯托克斯仿真。要注意的是,上述边界条件用作仿真参数的示例,并且四个仿真的相应仿真参数在除了上述边界条件之外的方面上可以彼此不同。

[0102] 被应用于纳维叶-斯托克斯仿真的仿真参数的四个集合可以分别结果得到四个高保真度解,如上面结合图4的步骤406所描述的那样。然后,这四个高保真度解可以用于构建响应表面(步骤520),其过程可以包括导出降阶模型的参数。图4中的项504是降阶模型的参数的视觉描绘。降阶模型可以是具有以表达式(3)和(4)形式的数学关系的降阶模型,并且可以被构造成使得降阶模型产生与过程510的高保真度模型针对这四个高保真度仿真相同的结果。

[0103] 图6图示了用于降阶建模的响应表面的探测。如所示出,可以基于由经修改的几何形状601指示的配置来探测(一个或多个)响应表面。经修改的几何形状601可以是如上针对步骤407所描述的经血运重建的几何形状,并且可以以图形形式而可表示,诸如三维图形模型(例如,表面网状物),如图6中所示的那样。经修改的几何形状601可以是解剖模型,并且可以表示要通过仿真来探索或分析的特定解剖几何形状;例如,该几何形状可以是患者的自然或规划的状态。经修改的几何形状601可以不同于理想化505。

[0104] 对(一个或多个)响应表面的探测可以获得降阶模型的参数的值。可以执行降阶模型以获得血液动力学解。在过程610中,血液动力学解可以连同经修改的几何形状601的三维图形模型一起以图形方式被显示。例如,血液动力学解可以以图形形式来表示,并且血液动力学解的图形可以与经修改的几何形状610的三维图形模型重叠或以其他方式组合,以获得所映射的模型602。所映射的模型602可以例如被显示在电子显示器上。这种显示可以实时执行。

[0105] 本公开中描述的方法可以具有各种临床应用,包括:规划经皮冠状动脉介入(PCI)程序;规划旁路移植植物外科手术;对疾病进展和病变消退进行建模;对病变的阳性和阴性重塑进行建模;对流动仿真的灵敏度分析、不确定性量化和/或置信区间估计;对不同生理条件(诸如,锻炼)的建模;对药物、海拔或自动调节机制的影响进行建模。

[0106] 在一些实施例中,本公开中描述的方法可以用于响应于患者的血管管腔几何形状的改变而产生血流储备分数(FFR)(例如,从计算机断层摄影(FFRCT)中导出的血流储备分数)的实时更新。血管管腔几何形状的改变可以是自然改变,或者是预期作为针对患者的候选治疗的结果而发生的改变。例如,管腔几何形状可以被表示为一个或多个参数,并且用户或仿真过程可以调节这种参数的值以反映血管管腔几何形状的改变。响应于建模参数的调节,执行仿真的计算机系统可以标识针对降阶建模的配置,基于配置来探测(一个或多个)响应表面以对降阶模型进行参数化,并且求解降阶模型以计算FFRCT的(一个或多个)

值。根据本公开(例如,图3和图4)中描述的方法,(一个或多个)响应表面可能已经在仿真之前生成。FFRCT的所计算的(一个或多个)值可以以任何合适的方式来输出(例如,在显示设备上显示,或被传输到另一个计算机系统以用于在显示设备上显示)。血管管腔几何形状可以是患者的冠状动脉的一部分,或另一血管系统部分的一部分。

[0107] 在本公开中讨论的被理解为计算机可实现的任何方法——包括图2-6中所示的方法以及结合表达式(1)至(11)所描述的任何计算——可以由计算机系统的一个或多个处理器来执行。由一个或多个处理器执行的方法步骤也可以被称为操作。

[0108] 图7描绘了其中这种计算机系统可以被实现为服务器系统740的环境的示例。除了服务器系统740之外,图7的环境进一步包括多个医生720和第三方提供者730,它们中的任一个可以通过一个或多个计算机、服务器和/或手持移动设备连接到电子网络710,诸如互联网。在图1中,医生720和第三方提供者730可以均表示计算机系统、以及使用这种系统的组织。例如,医生720可以是医院或医院的计算机系统。

[0109] 医生720和/或第三方提供者730可以创建或以其他方式获得医学图像,诸如一个或多个患者的心脏、血管和/或器官系统的图像。医生720和/或第三方提供者730还可以获得患者特定信息的任何组合,诸如年龄、医学历史、血压、血液粘度、上面结合图3的方法的步骤301所描述的解剖信息、以及其他类型的患者特定信息。医生720和/或第三方提供者730可以通过电子网络710将患者特定信息传输到服务器系统740。

[0110] 服务器系统740可以包括一个或多个存储设备760,以用于存储从医生720和/或第三方提供者730接收到的图像和数据。存储设备760可以被认为服务器系统740的存储器的组件。服务器系统740还可以包括一个或多个处理设备750,以用于处理存储在存储设备中的图像和数据,并且用于执行本公开中描述的任何计算机可实现的过程。处理设备750中的每一个可以是处理器或包括至少一个处理器的设备。

[0111] 在一些实施例中,服务器系统740可以具有带有用于计算和/或数据存储的可缩放资源的云计算平台,并且可以在云计算平台上运行用于执行本公开中描述的方法的应用。在这种实施例中,任何输出可以被传输到另一个计算机系统(诸如,个人计算机),以用于显示和/或存储。

[0112] 用于执行本公开的方法的计算机系统的其他示例包括台式计算机、膝上型计算机、以及移动计算设备(诸如,平板电脑和智能电话)。

[0113] 一个或多个处理器可以被配置成通过有权访问指令(例如,软件或计算机可读代码)来执行这种过程,该指令在被一个或多个处理器执行时使得一个或多个处理器执行这些过程。指令可以被存储在计算机系统的存储器中。处理器可以是中央处理单元(CPU)、图形处理单元(GPU)或另一类型的处理单元。

[0114] 计算机系统(诸如,服务器系统740)可以包括一个或多个计算设备。如果计算机系统的一个或多个处理器被实现为多个处理器,则多个处理器可以被包括在单个计算设备中或者分布在多个计算设备当中。如果计算机系统包括多个计算设备,则计算机系统的存储器可以包括多个计算设备中的每个计算设备的相应存储器。

[0115] 一般而言,计算设备可以包括(一个或多个)处理器(例如,CPU、GPU或其他处理单元)、存储器和(一个或多个)通信接口(例如,网络接口)以便与其他设备通信。存储器可以包括:易失性存储器,诸如RAM,和/或非易失性存储器,诸如ROM和存储介质。存储介质的示

例包括固态存储介质(例如,固态驱动器和/或可移除闪速存储器)、光学存储介质(例如,光盘)和/或磁性存储介质(例如,硬盘驱动器)。上述指令(例如,软件或计算机可读代码)可以被存储在存储器的任何易失性和/或非易失性存储器组件中。在一些实施例中,计算设备可以进一步包括(一个或多个)输入设备(例如,键盘、鼠标或触摸屏)和(一个或多个)输出设备(例如,显示器、打印机)。计算设备的上述元件可以通过表示一个或多个总线的总线而彼此连接。在一些实施例中,计算设备的(一个或多个)处理器包括CPU和GPU两者。

[0116] 可由一个或多个处理器执行的指令可以被存储在非暂时性计算机可读介质上。因此,每当在本公开中描述计算机实现方法时,本公开也应被理解为描述存储指令的非暂时性计算机可读介质,该指令在被一个或多个处理器执行时配置或使得一个或多个处理器执行该计算机实现方法。非暂时性计算机可读介质的示例包括:RAM、ROM、固态存储介质(例如,固态驱动器)、光学存储介质(例如,光盘)和磁性存储介质(例如,硬盘驱动器)。非暂时性计算机可读介质可以是计算机系统的存储器的一部分,或者与任何计算机系统分离。“电子存储设备”可以包括上面描述的任何非暂时性计算机可读介质。

[0117] 应当领会的是,在示例性实施例的以上描述中,出于简化本公开和帮理解各种发明方面的一个或多个的目的,各种特征有时被分组在单个实施例、图或其描述中。然而,本公开的该方法不应被解释为反映了所要求保护的发明需要比每项权利要求中明确记载的特征更多的特征的意图。而是,如以下权利要求所反映的那样,发明方面在于少于单个前述公开的实施例的所有特征。因此,特此将具体实施方式之后的权利要求明确地并入到该具体实施方式中,其中每项权利要求独立地作为本公开的单独实施例。

[0118] 此外,虽然本文中描述的一些实施例包括一些特征但不包括在其他实施例中包括的其他特征,但是不同实施例的特征的组合意在处于本公开的范围,并且形成不同的实施例,如本领域技术人员将理解的那样。例如,在以下权利要求中,任何所要求保护的实施例可以以任何组合来使用。

[0119] 因此,虽然已经描述了某些实施例,但是本领域技术人员将认识到,在不脱离本公开的精神的情况下,可以对其进行其他和进一步的修改,并且意图将所有这种改变和修改主张为落入本公开的范围。例如,可以从框图添加或删除功能性,并且可以在功能框间互换操作。在本公开的范围,可以向所描述的方法添加或删除步骤。

[0120] 上面公开的主题要被认为是说明性的,而不是局限性的,并且所附权利要求意图覆盖落入本公开的真实精神和范围内的所有这种修改、增强和其他实现方式。因此,在法律所允许的最大程度上,本公开的范围将由以下权利要求及其等同物的最宽泛的准许解释来确定,并且不应由前述详细描述来局限或限制。虽然已经描述了本公开的各种实现方式,但是对于本领域普通技术人员来说将清楚的是,在本公开的范围,更多的实现和实现方式是可能的。因此,本公开将不受局限。

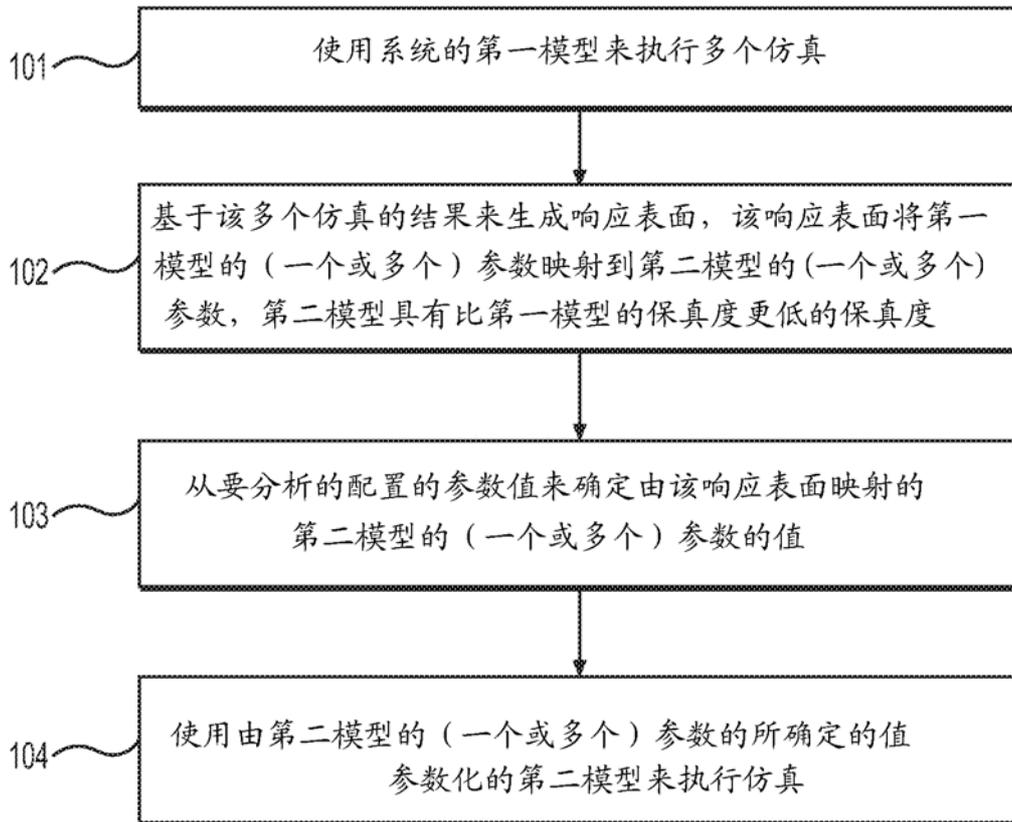


图 1

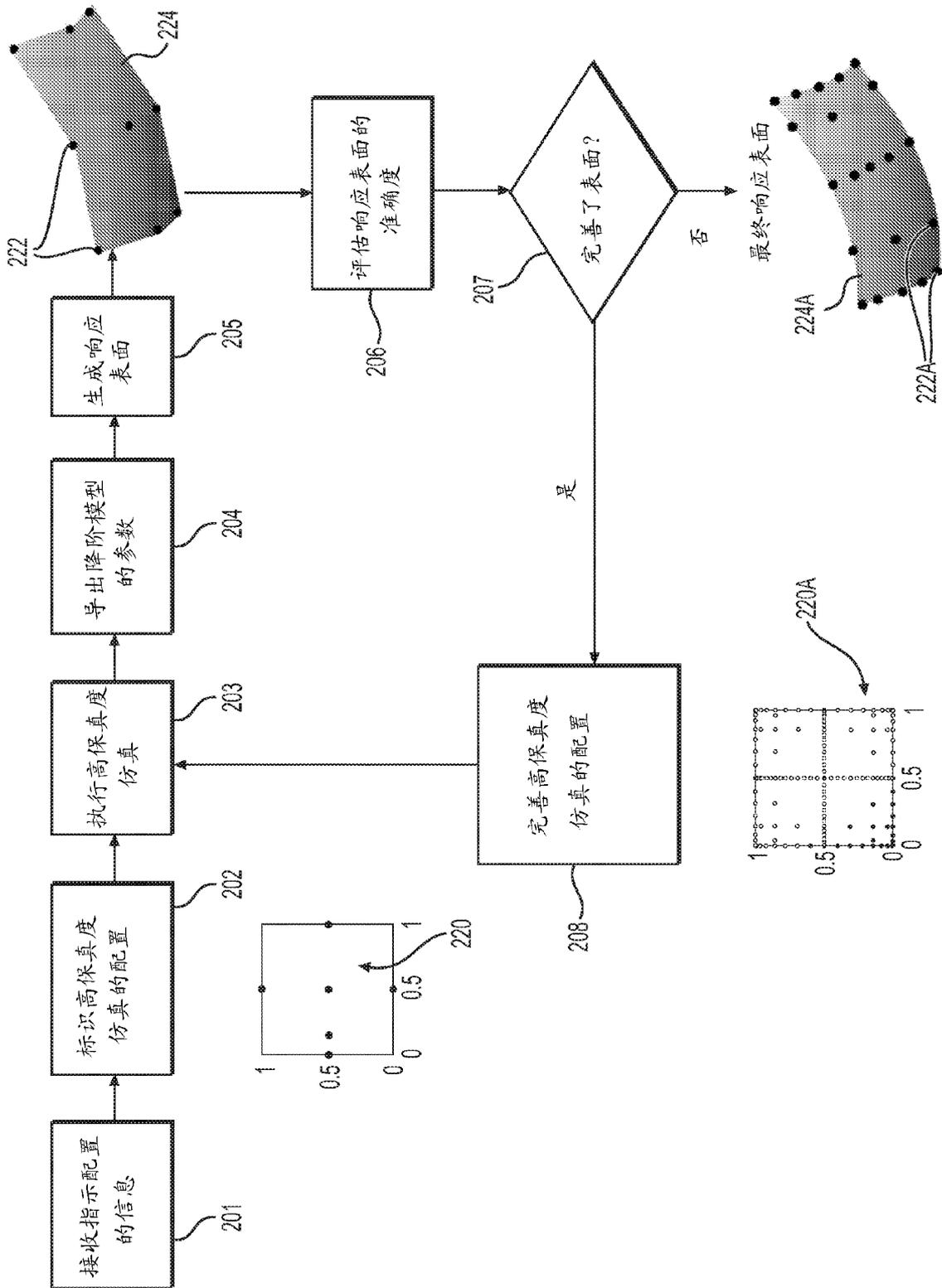


图 2A

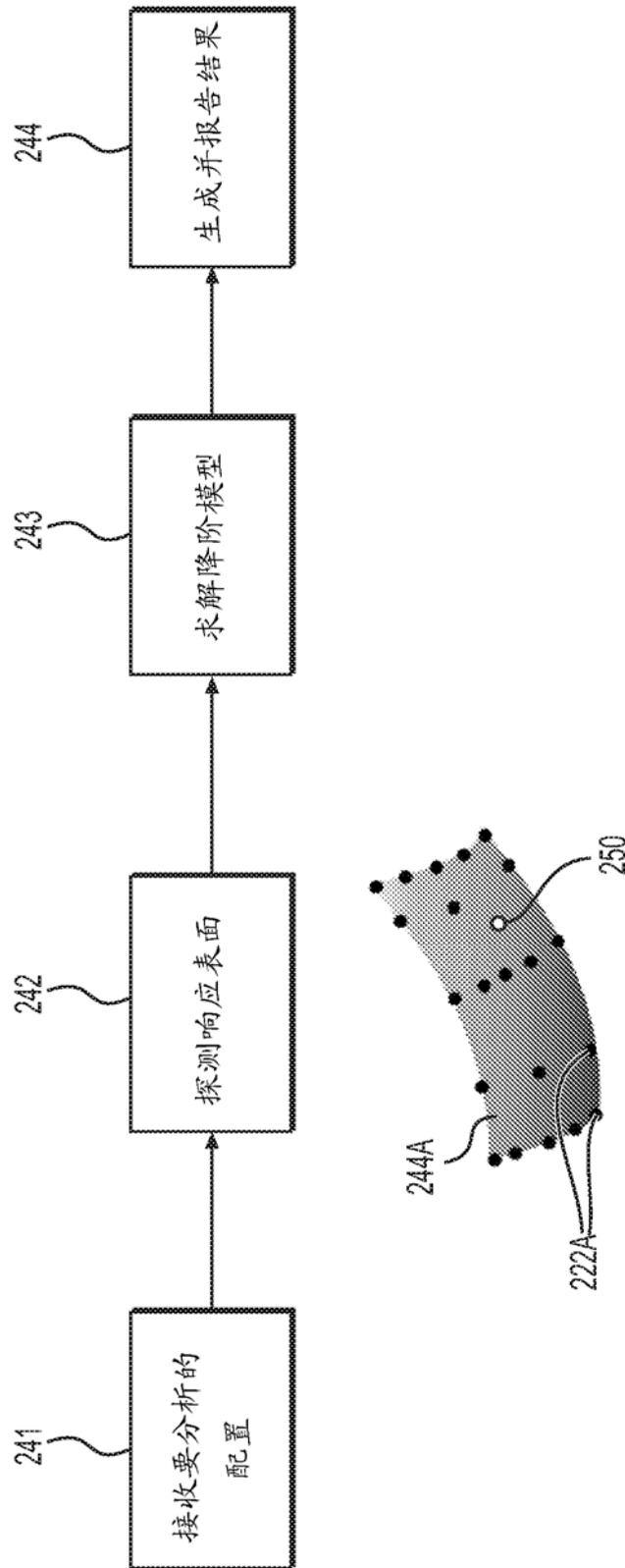


图 2B

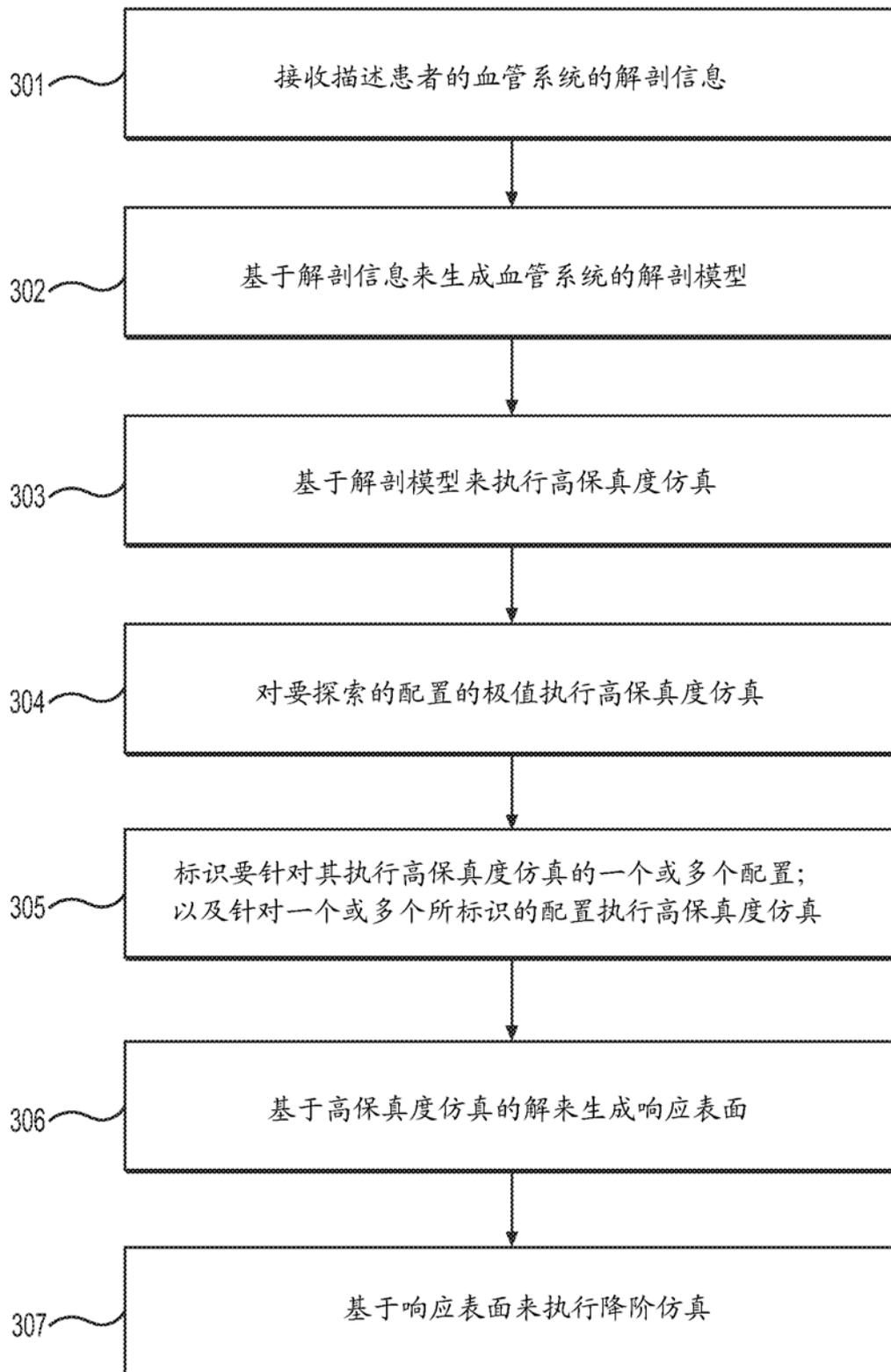


图 3

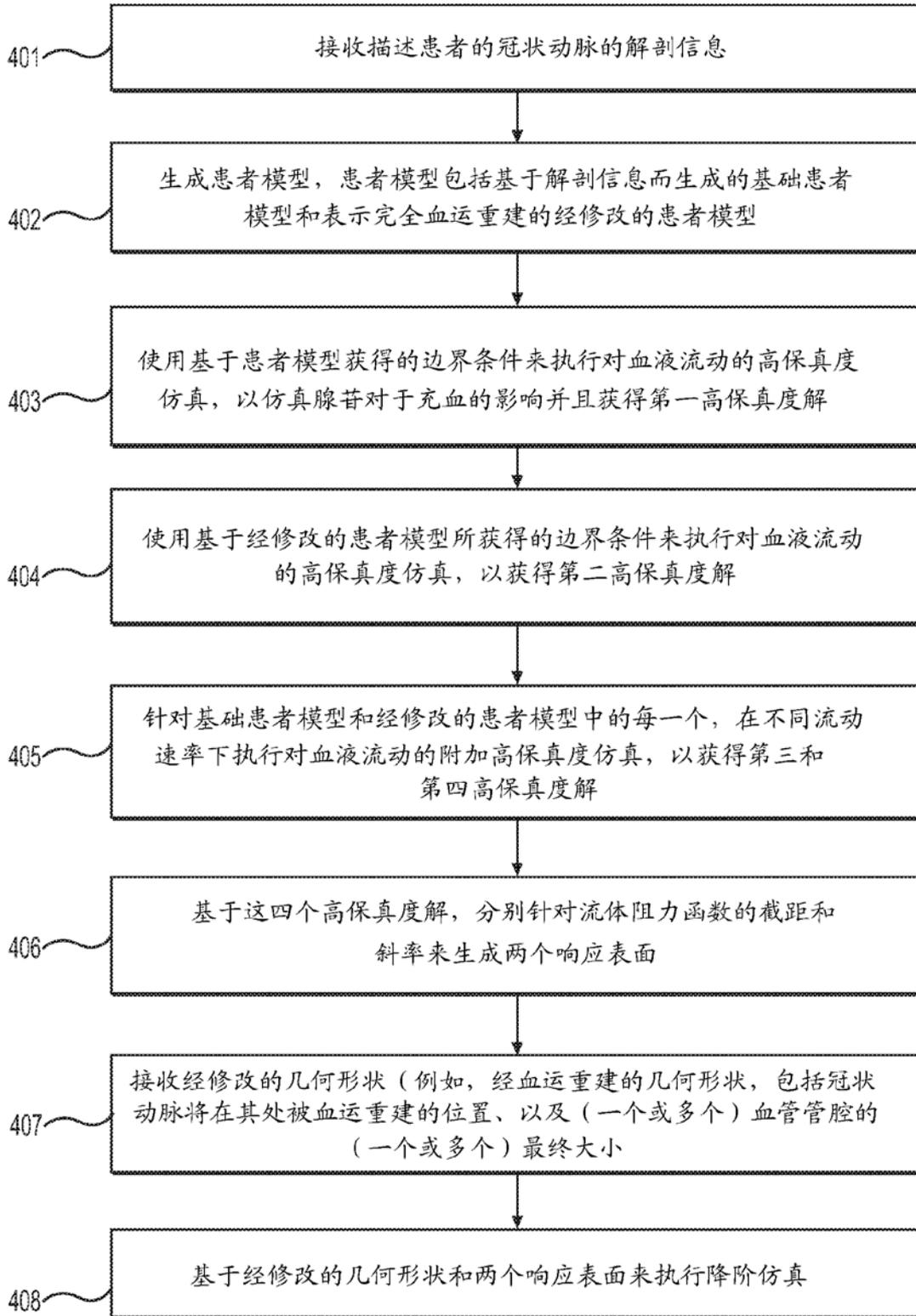


图 4

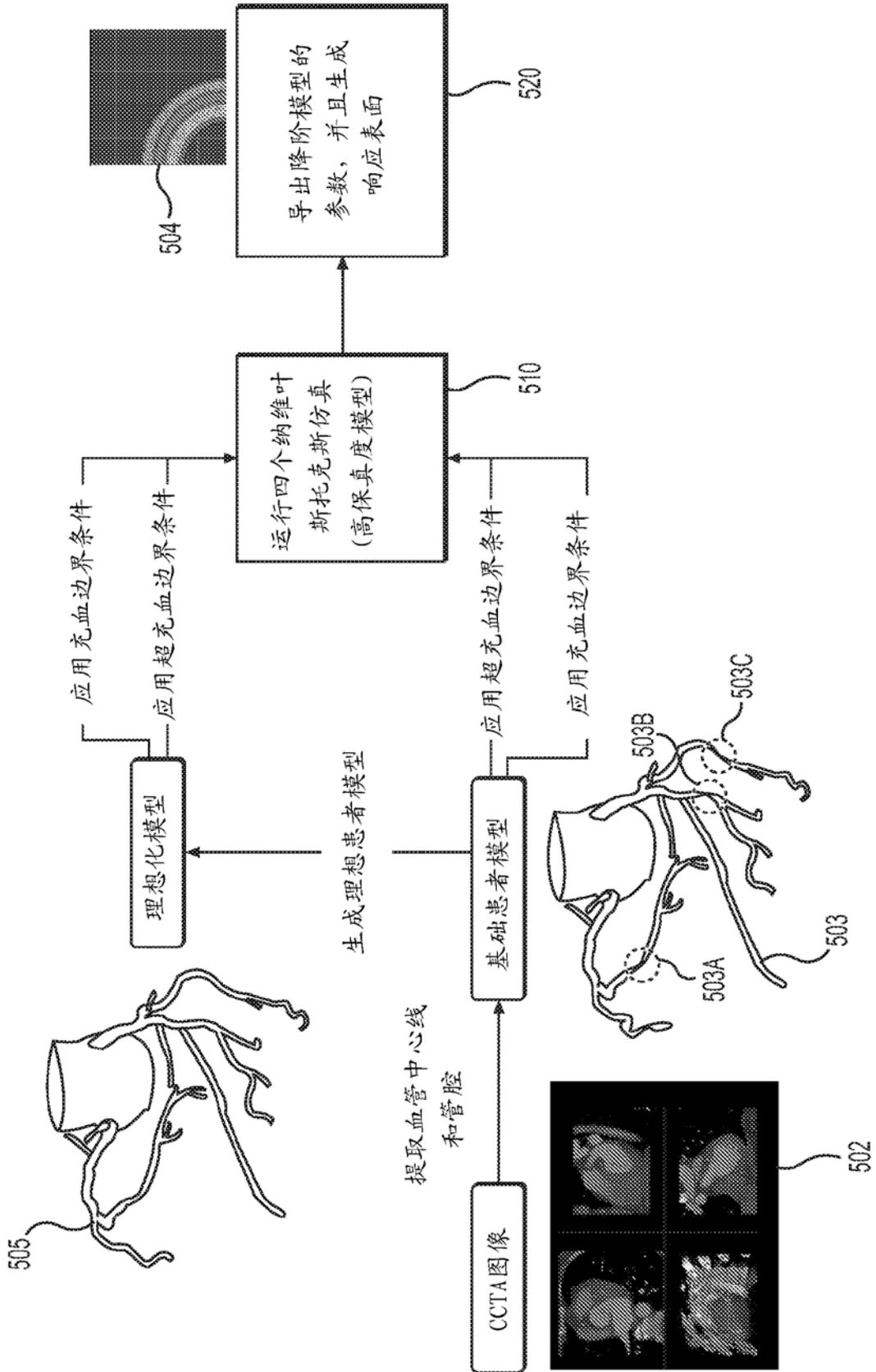


图 5

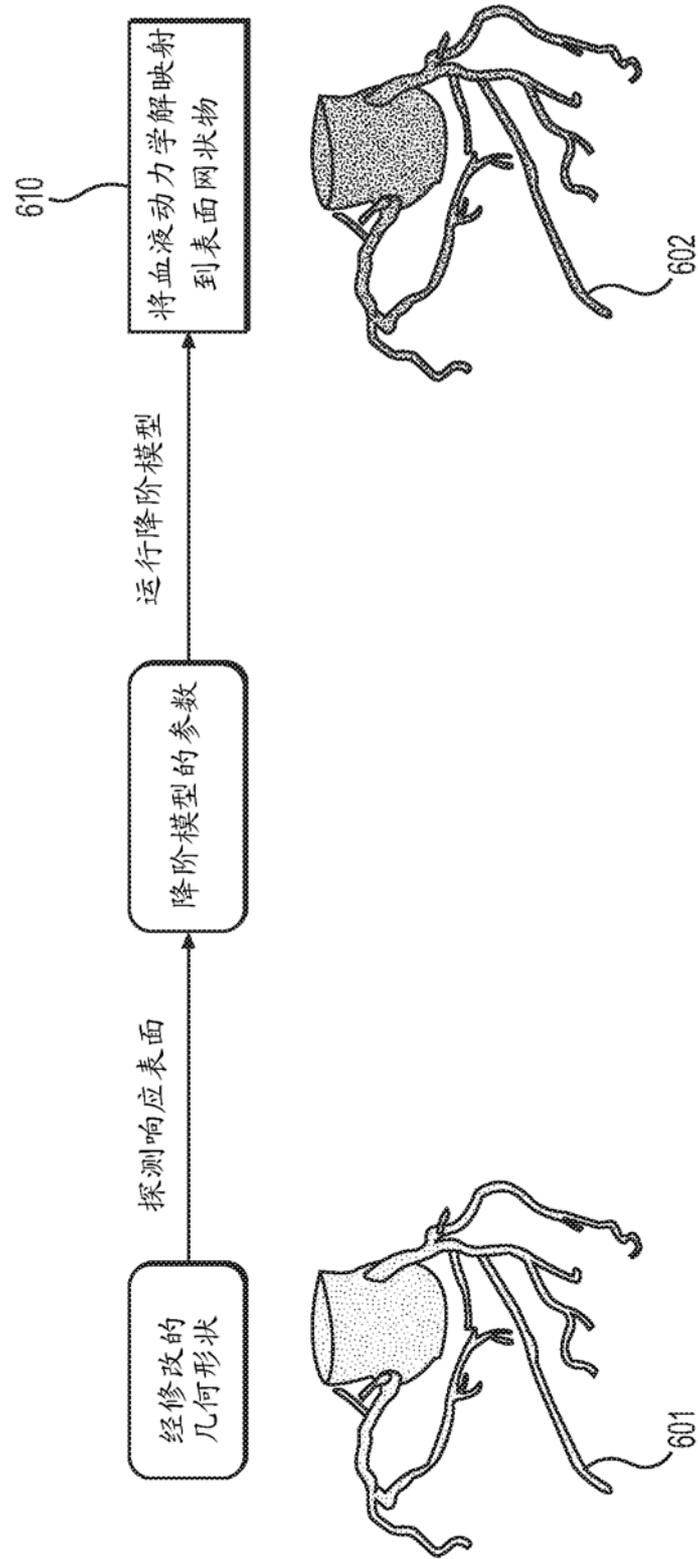


图 6

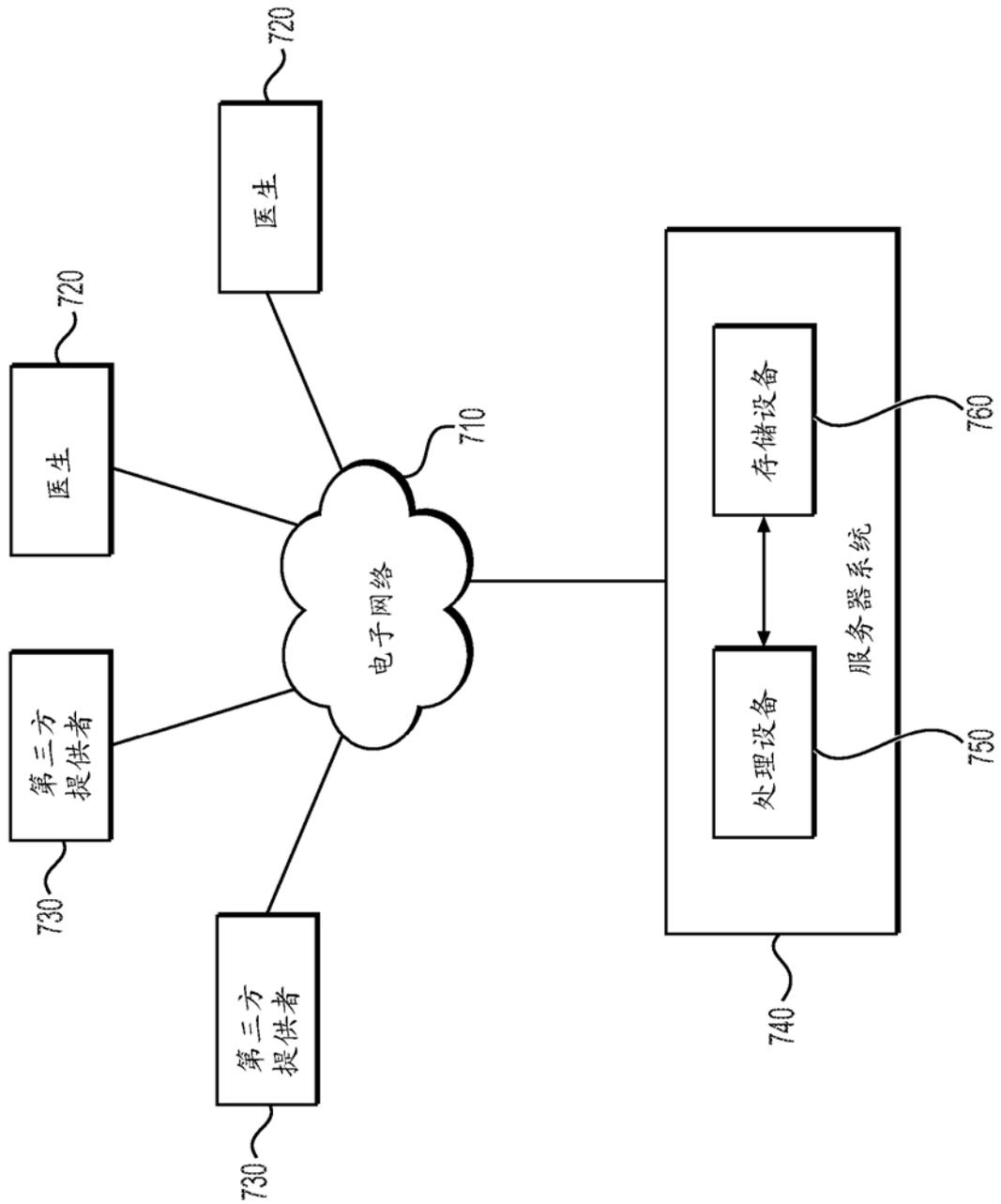


图 7