



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109996495 B

(45) 授权公告日 2023.04.28

(21) 申请号 201780072241.9

(72) 发明人 H·尼克基施 H·施米特

(22) 申请日 2017.11.16

S·普雷弗尔哈尔 M·P·弗赖曼
L·戈申

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109996495 A

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

(43) 申请公布日 2019.07.09

专利代理人 李光颖 王英

(30) 优先权数据

62/425181 2016.11.22 US

(51) Int.CI.

A61B 6/03 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

A61B 6/00 (2006.01)

2019.05.22

G06T 7/10 (2006.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

G16H 50/50 (2006.01)

PCT/EP2017/079378 2017.11.16

(56) 对比文件

(87) PCT国际申请的公布数据

CN 104768465 A, 2015.07.08

W02018/095791 EN 2018.05.31

WO 2011093921 A1, 2011.08.04

(73) 专利权人 皇家飞利浦有限公司

审查员 张玲玲

地址 荷兰艾恩德霍芬

权利要求书2页 说明书8页 附图7页

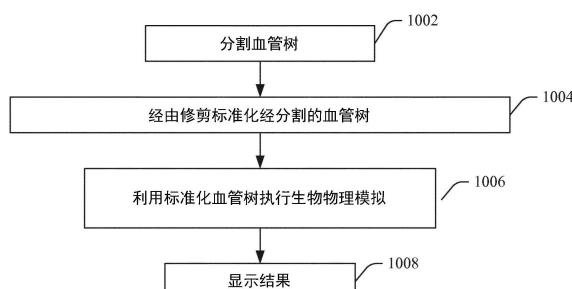
(54) 发明名称

用于生物物理模拟的血管树标准化和/或用于经修剪的部分的扩展模拟

(57) 摘要

一种计算系统(126)包括具有计算机可执行指令(128)的计算机可读存储介质(130)，所述计算机可执行指令包括：分割标准化器(120)，其被配置为根据从体积图像数据分割的经分割的血管树和预定的一组修剪规则(206)来确定标准化血管树，以及生物物理模拟器(122)，其被配置为基于标准化血管树执行生物物理模拟。所述计算系统还包括处理器(124)，所述处理器被配置为执行分割标准化器，以根据从体积图像数据分割的经分割的血管树和预定的一组修剪规则来确定标准化血管树，并且被配置为执行生物物理模拟器，以基于标准化血管树执行生物物理模拟。所述计算系统还包括显示器，所述显示器被配置为显示标准化血管树和生物物理模拟的结果中的至少一项。

CN



CN 109996495 B

1. 一种计算系统(126),包括:

计算机可读存储介质(130),其具有计算机可执行指令(128),所述计算机可执行指令包括:分割标准化器(120),其被配置为根据从体积图像数据分割的经分割的血管树和预定的一组修剪规则(206)来确定标准化血管树,所述标准化血管树具有血管段,所述血管段具有预定长度;以及生物物理模拟器(122),其被配置为基于所述标准化血管树来执行生物物理模拟;

处理器(124),其被配置为执行所述分割标准化器以根据从体积图像数据分割的所述经分割的血管树和所述预定的一组修剪规则来确定所述标准化血管树,并且被配置为执行所述生物物理模拟器以基于所述标准化血管树来执行生物物理模拟;以及

显示器,其被配置为显示以下中的至少一项:所述标准化血管树、以及所述生物物理模拟的结果。

2. 根据权利要求1所述的计算系统,其中,所述预定的一组修剪规则至少包括:主血管修剪规则(206)、短血管修剪规则(208)、感兴趣位置修剪规则(210)、远端段修剪规则(212)和血管直径修剪规则(214)。

3. 根据权利要求2所述的计算系统,其中,所述处理器仅在主血管从主动脉到所述血管的端部的长度大于预定主血管长度的情况下基于所述主血管修剪规则来修剪所述主血管,并且仅将所述主血管修剪到所述预定主血管长度。

4. 根据权利要求3所述的计算系统,其中,所述处理器仅在短血管的长度小于预定短血管长度的情况下基于所述短血管修剪规则来修剪掉血管。

5. 根据权利要求4所述的计算系统,其中,所述处理器仅在血管的端部距感兴趣位置的长度大于预定感兴趣位置长度的情况下基于所述感兴趣位置修剪规则来从所述感兴趣位置修剪所述端部,并且仅将所述端部修剪到所述预定感兴趣位置长度。

6. 根据权利要求5所述的计算系统,其中,所述处理器仅在血管的远端端部距分支的长度大于预定远端段长度的情况下基于所述远端段修剪规则来从所述分支修剪所述远端端部,并且仅将所述远端端部修剪到所述预定远端段长度。

7. 根据权利要求6所述的计算系统,其中,所述远端段修剪规则受所述主血管修剪规则和所述感兴趣位置修剪规则的约束。

8. 根据权利要求6所述的计算系统,其中,所述处理器仅在血管的血管直径大于预定血管直径的情况下基于所述血管直径修剪规则来从所述血管的出口朝向所述血管的入口修剪所述血管,并且仅将所述血管修剪到直到达到所述预定血管直径。

9. 根据权利要求2至8中的任一项所述的计算系统,其中,所述生物物理模拟器还包括经修剪的血管段处理器(602),所述经修剪的血管段处理器被配置为仅对所述经分割的血管树的经修剪的部分执行生物物理模拟。

10. 根据权利要求9所述的计算系统,其中,对于作为经修剪的血管的延续的经修剪的部分,所述处理器将来自所述标准化血管树的所述生物物理模拟的体积流率和绝对压力用作用于仅针对所述经修剪的部分的模拟的初始值,以确定针对所述经修剪的部分的所述生物物理模拟。

11. 根据权利要求9所述的计算系统,其中,对于整个经修剪的子树,所述处理器通过求解非线性方程组以获得流量和压力并且确定针对所述经修剪的子树的所述生物物理模拟

来模拟整个液压网络。

12. 根据权利要求9所述的计算系统,其中,对于从另一血管修剪的整个经修剪的血管或子树,所述处理器确定恒定压力并且沿所述整个经修剪的血管或子树分配恒定值。

13. 根据权利要求9所述的计算系统,其中,所述显示器被配置为显示所述经分割的血管树以及针对所述标准化血管树和所述经修剪的部分的模拟结果。

14. 一种编码有计算机可读指令的计算机可读存储介质,所述计算机可读指令当由计算系统的处理器执行时使所述处理器:

执行分割标准化器,所述分割标准化器被配置为使用预定的一组修剪规则根据从体积图像数据分割的经分割的血管树来确定标准化血管树,所述标准化血管树具有血管段,所述血管段具有预定长度;

执行生物物理模拟器,所述生物物理模拟器被配置为基于所述标准化血管树来执行生物物理模拟;以及

经由显示监测器进行显示,所述显示监测器被配置为显示以下中的至少一项:所述标准化血管树、以及所述生物物理模拟的结果。

15. 根据权利要求14所述的计算机可读存储介质,其中,所述预定的一组修剪规则至少包括:主血管修剪规则(206)、短血管修剪规则(208)、感兴趣位置修剪规则(210)、远端段修剪规则(212)和血管直径修剪规则(214)。

用于生物物理模拟的血管树标准化和/或用于经修剪的部分的扩展模拟

技术领域

[0001] 下文总体上涉及生物物理模拟,诸如血流储备分数(FFR)、瞬时无波比(iFR)、流模拟和/或其他生物物理模拟,并且更具体地涉及用于生物物理模拟的血管树标准化和/或在标准化期间用于从血管树修剪掉的血管的部分的生物物理模拟的扩展,并且,具体应用于血流储备分数计算机断层摄影(FFR-CT)来描述。但是,下文也适用于其他成像模态,包括X射线、磁共振成像(MRI)和/或其他成像模态,和/或其他生物物理模拟。

背景技术

[0002] 冠状动脉疾病是全世界范围的最大死因之一。血流储备分数(FFR)是导管插入实验室(Cath Lab)中已确立的侵入性量度,以经由FFR指数量化由于钙化或软斑块的冠状动脉病变的血液动力学显著性。该指数指示冠状动脉狭窄的功能上的严重性,其从冠状动脉血管造影期间做出的压力测量结果来计算,并且被定义为在充血条件下相对于近端压力(接近窦口)的远端血压(狭窄后面)。也就是说,FFR指数表达与假设没有狭窄的最大流量相比在存在狭窄的情况下的血管的最大流量下降。FFR值是在0和1之间的绝对数,其中,值0.50指示给定的狭窄引起血压的50%下降。

[0003] FFR是一种侵入性流程,其中,其需要将导管插入到股动脉或桡动脉中,并将导管推进到狭窄,其中,在导管尖端处的传感器在由影响血管几何结构、顺应性和阻力的各种试剂促进的条件期间感测压力、温度和跨狭窄的流量,和/或其他特征。FFR-CT是基于标准心脏CT血管造影(CCTA)的用于侵入性FFR的基于非侵入性模拟的替代物。该方法估计FFR指数是通过计算流体动力学(CFD)模拟,其中,模拟通过冠状动脉的血流和压力。遗憾的是,一种模拟方法需要将CCTA发送到用于进行处理的场外中心数据中心,所述处理包括心脏分割、冠状动脉分割和FFR模拟,这能够延迟结果。

[0004] 常规CTA扫描中自动分割的冠状动脉的长度取决于有效图像分辨率和冠状动脉中的良好的造影剂摄取。此外,在人类操作者指导冠状动脉树提取的半自动分割中,人类操作者的能力和努力也强烈贡献于所提取的血管的数量和长度。在FFR-CT预测中使用的患者特异性生物物理模型的边界条件被认为是模拟微脉管系统的效应,其通常在图像中是不可见的。它们通常应用于冠状动脉分割的远端。群体平均和/或尺度定律用于对边界条件整形;因此,它们取决于血管的局部尺寸和宽度,并且因此也取决于操作者、图像分辨率等。遗憾的是,这能够妨碍FFR-CT模拟的再现性和可靠性。

发明内容

[0005] 本文描述的各个方面解决了上述问题和其他问题。

[0006] 在一个方面中,一种计算系统包括具有计算机可执行指令的计算机可读存储介质,所述计算机可执行指令包括:分割标准化器,其被配置为根据从体积图像数据分割的经分割的血管树和预定的一组修剪规则来确定标准化的血管树,以及生物物理模拟器,其被

配置为基于标准化血管树执行生物物理模拟。计算系统还包括处理器，所述处理器被配置为执行分割标准化器，以根据从体积图像数据分割的经分割的血管树和预定的一组修剪规则来确定标准化血管树，并且被配置为执行生物物理模拟器，以基于标准化血管树执行生物物理模拟。所述计算系统还包括显示器，其被配置为显示标准化血管树和生物物理模拟的结果中的至少一项。

[0007] 在另一方面中，一种编码有计算机可读指令的计算机可读存储介质，所述计算机可读指令当由计算系统的计算机处理器执行时使计算机处理：执行分割标准化器，所述分割标准化器被配置为使用预定的一组修剪规则根据从体积图像数据分割的经分割的血管树来确定标准化血管树；执行生物物理模拟器，所述生物物理模拟器被配置为基于标准化血管树执行生物物理模拟；并且经由显示监测器进行显示，所述显示监测器被配置为显示标准化血管树和生物物理模拟的结果中的至少一项。

[0008] 在另一方面中，一种方法包括使用预定的一组修剪规则来标准化经分割的血管树，从而创建标准化血管树。所述方法还包括对标准化血管树执行生物物理模拟。所述方法还包括显示生物物理模拟的结果。

[0009] 本领域技术人员在阅读和理解说明书后将认识到本申请的其他方面。

附图说明

[0010] 本发明可以采取各种部件和部件布置以及各种步骤和各步骤安排的形式。附图仅出于图示优选的实施例的目的而不应被解释为对本发明的限制。

[0011] 图1示意性图示了计算系统，其被配置为至少通过选择性地修剪掉其部分来标准化经分割的血管树并确定针对标准化血管树的FFR指数，并且任选地，针对选择性地修剪掉的部分的FFR指数。

[0012] 图2示意性图示了用于标准化经分割的血管树的分割标准化器的范例。

[0013] 图3示出了在由分割标准化器进行修剪之前的经分割的血管树的范例。

[0014] 图4示出了在由使用本文所述的修剪规则的分割标准化器进行修剪之后的图3的经分割的血管树的范例。

[0015] 图5示意性图示了FFR指数确定器的范例，其计算针对标准化血管树的FFR指数。

[0016] 图6示出了标准化血管树，其上叠加有FFR指数。

[0017] 图7示意性示出了FFR指数确定器的范例，其计算针对标准化血管树和经修剪的部分的FFR指数。

[0018] 图8示出了经分割的血管树，其具有针对标准化血管树的FFR指数和在其上叠加的经修剪的部分。

[0019] 图9示意性图示了用于对经修剪的部分进行建模的集总参数模型。

[0020] 图10示出了用于确定标准化血管树和因此的FFR指数的范例方法。

[0021] 图11示出了用于确定标准化血管树和因此的FFR指数，以及用于其修剪掉的部分的范例方法。

具体实施方式

[0022] 下文总体上涉及用于生物物理模拟的血管树标准化和/或针对标准化期间从血管

树修剪掉的血管部分的生物物理模拟的扩展。为了简洁和解释的目的,下文具体应用于FFR-CT的非限制性范例进行描述。但是,应当理解,标准化血管树能够与使用血管或其他树结构的应用一起使用。

[0023] 图1示意性示出了诸如CT扫描器的成像系统100。成像系统100包括大致固定机架102和旋转机架104,旋转机架104由固定机架102可旋转地支撑并围绕检查区域106关于z轴旋转。诸如沙发的对象支撑体108支撑检查区域106中的物体或对象。

[0024] 诸如X射线管的辐射源110由旋转机架104可旋转地支撑,与旋转机架104一起旋转,并且发射穿过检查区域106的辐射。辐射敏感探测器阵列112跨检查区域106与辐射源110相对围成一角弧。辐射敏感探测器阵列112探测穿过检查区域106的辐射并生成指示针对每个探测到的光子的信号。

[0025] 重建器114重建投影数据,从而生成指示位于检查区域106中的物体或对象的被扫描部分的体积图像数据。通用计算系统或计算机用作操作者控制台116。控制台116包括诸如监测器的人工可读输出设备和诸如键盘、鼠标等的输入设备。驻留在控制台116上的软件允许操作者经由图形用户界面(GUI)或其他方式与扫描器100交互和/或操作扫描器100。

[0026] 分割器118被配置为便于从体积图像数据分割血管树。在一个实例中,这包括分割冠状动脉树,识别经分割的冠状动脉树的血管的中心线,标记诸如左冠状动脉(LCA)、右冠状动脉(RCA)、左前降动脉(LDA)等的主要血管和/或标记诸如狭窄的位置的(一个或多个)感兴趣位置。能够利用手动、半自动和/或自动分割方法。在Bülow等人的“*A General Framework for Tree Segmentation and Reconstruction from Medical Volume Data*”(MICCAI 2004,第3216卷,Lecture Notes in Computer Science,第533-540页)和Gülsün等人的“*Coronary Centerline Extraction via Optimal Flow Paths and CNN Path Pruning*”(MICCAI 2016,第9902卷,Lecture Notes in Computer Science,第317-325页)中描述了分割的范例。

[0027] 分割标准化器120被配置为标准化经分割的血管树。如下面更详细描述的,在一个非限制性实例中,这包括应用一组预定规则,其选择性地将血管树的一个或多个血管(包括考虑感兴趣位置)修剪或修改到“标准化”配置或树。这样一来,用于确定FFR(标准化血管树)的血管树的形状、尺寸和/或几何结构仅仅很少地取决于(如果有的话)图像分辨率、对比摄取和/或操作者的分割,而不同于原始分割。后续的FFR-CT模拟将是可靠的,具有准确可靠的边界条件和准确的预测。

[0028] 生物物理模拟器122被配置为至少对标准化的经分割的血管树进行处理,以执行生物物理模拟。关于FFR,生物物理模拟器确定其FFR指数。如下面更详细描述的,在变型中,使用标准化的经分割的血管树的模拟结果将模拟扩展到经修剪的区域,以确定用于经修剪的部分的初始条件。这样一来,本文所描述的方法不仅在入口和出口处而且在血管树的血管内部的位置处的模拟中加强边界条件。因此,能够执行标准化患者特异性生物物理模拟,其中,通过移位边界条件并将模拟扩展到更远来实现标准化。

[0029] FFR方法的范例在2013年5月10日递交的、序列号US 14/396407、公布号US 2015/0092999 A1、名为“*Determination of a fractional flow reserve (ffr) value for a stenosis of a vessel*”的专利申请、2013年10月24日递交的、序列号US 14/437990、公布号US 2015/0282765 A1,名为“*Fractional flow reserve (ffr) index*”的专利申请,以及

2013年10月22日递交的、序列号US 14/059517、公布号US2015/0112191 A1、名为“Fractional flow reserve (ffr) index with adaptive boundary condition parameters”的专利申请中进行了描述,通过引用将全部三个专利申请整体并入本文。FFR指数能够经由显示监测器132被显示,被存储,被传达到其他设备等。

[0030] 在图示的范例中,分割器118、分割标准化器120和/或生物物理模拟器122利用计算系统126的一个或多个计算机处理器124(例如,中央处理单元或CPU、微处理器等)来实施,计算系统126执行存储在诸如物理存储器和/或其他非瞬态存储介质的一个或多个计算机可读存储介质130(其排除瞬态介质)中的一个或多个计算机可读指令128。(一个或多个)处理器124可以额外地或备选地执行由载波、信号和/或其他瞬态介质承载的一个或多个计算机可读指令。如图所示,指令128是就地执行的。在另一实例中,例如,经由“云”和/或其他计算资源或服务远程于系统126计算指令128中的一个或多个。

[0031] 图2示意性图示了分割标准化器120的范例。

[0032] 分割标准化器120的所图示的范例包括血管修剪器202,血管修剪器202被配置为使用预定的一组修剪规则204来修剪经分割的血管树。预定的一组修剪规则204包括N个规则,其中,N是正整数。在一个实例中,预定的一组修剪规则204是默认的一组规则。在另一实例中,预定的一组修剪规则204包括至少一个用户和/或设施定义的规则。在另一实例中,预定的一组修剪规则204包括默认的和用户和/或设施定义的规则的组合。

[0033] 所图示的预定的一组修剪规则204包括主血管修剪规则206、短血管修剪规则208、感兴趣位置(LOI)修剪规则210、远端段修剪规则212、血管直径修剪规则214和/或一个或多个其他修剪规则216。在变型中,省略一个或多个其他修剪规则216,并且预定的一组修剪规则204仅包括规则206-214。在另一实施例中,省略规则206-214中的一个或多个。另一修剪规则能够基于患者特异性参数,其能够特定于图像数据的分辨率、患者解剖结构和/或人口统计,诸如男性或女性、成人或儿童等。

[0034] 主血管修剪规则206的范例是主血管(例如,RCA、LCA、LAD等)仅在其例如沿着中心线距主动脉的窦口的长度大于预定长度时被修剪。如果主血管长度等于或小于预定长度,则不修剪主血管。如果主血管长度大于预定长度,则修剪主血管,但仅到预定长度。在一个实例中,预定长度是8厘米(8cm)至12厘米(12cm)范围内的单个值。在另一实例中,预定长度是9厘米(9cm)至11厘米(11cm)范围内的单个值。在另一实例中,预定长度是10厘米(10cm)。

[0035] 短血管修剪规则210的范例是血管在血管具有沿着中心线小于预定长度的长度时被修剪掉。因此,如果血管具有小于预定长度的长度,则将血管从血管树中移除。如果血管具有等于或大于预定长度的长度,则不对血管进行修剪。在一个实例中,预定长度在0.25至2厘米(0.25-2.0cm)的范围内。在另一实例中,预定长度在0.5至1.5厘米(0.5-1.5cm)的范围内。在另一实例中,预定长度是1厘米(1cm)。

[0036] 感兴趣位置修剪规则210的范例是仅在其距所识别的兴趣位置的长度其大于预定长度时修剪血管的端部,所述感兴趣位置能够经由鼠标点击血管的显示部分和/或其他方式来识别。如果长度等于或小于距感兴趣位置的预定长度,则不修剪端部。如果长度大于预定长度,则修剪端部但仅修剪到预定长度。在一个实例中,预定长度在0.5到3厘米(0.5-3.0cm)的范围内。在另一实例中,预定长度在1.0到2.5厘米(1.0-2.5cm)的范围内。在另一实例中,预定长度是2.0厘米(2.0cm)。

[0037] 远端段修剪规则212的范例是,作为最远端分支后面的段的最远端段在其长度大于距离分叉的预定长度时被修剪。如果最远端段的长度等于或小于预定长度,则不修剪最远端段。如果最远端段的长度大于预定长度,则修剪最远端段但仅修剪到预定长度。在一个实例中,预定长度在0.5到3厘米(0.5-3.0cm)的范围内。在另一实例中,预定长度在1.0到2.5厘米(1.0-2.5cm)的范围内。在另一实例中,预定长度是2.0厘米(2.0cm)。

[0038] 在一个实例中,范例远端段修剪规则212由主血管修剪规则206和感兴趣位置修剪规则210约束。例如,仅在结果满足主血管修剪规则206和感兴趣位置修剪规则210时应用远端段修剪规则212。如果远端段修剪规则212的结果不满足主血管修剪规则206和感兴趣位置修剪规则210,则不应用远端段修剪规则212。例如,如果应用远端段修剪规则212将导致主血管小于10cm或者远端距离感兴趣位置小于2cm,则不应用规则212。

[0039] 血管直径修剪规则212的范例是,在血管的直径大于预定血管直径时从出口(血管端部)朝向入口(其被连接到另一血管或主动脉的区域)修剪血管。如果血管直径等于或小于预定直径,则不修剪血管。如果血管直径大于预定直径,则血管被修剪但仅直到血管直径等于或小于预定直径。在一个实例中,预定直径在0.5毫米到2.5毫米(0.5-2.5mm)的范围内。在另一实例中,预定直径在1.0到2.0毫米(1.0-2.0mm)的范围内。在另一实例中,预定直径是1.5毫米(1.5mm)。

[0040] 通过应用本文所描述的修剪规则,作为用于计算FFR指数的树的标准化血管树至少满足以下中的一个或多个:1) 血管段在最后一个分支位置之后具有标准化长度;2) 在固定图像分辨率下没有明确定义的直径太小的血管的远端部分具有小的相关性;3) 血管残端,即具有不可靠的尺寸/体积的非常短的血管被忽略;4) 诸如LAD、LCA和RCA的主要血管具有最小长度;5) 人类操作者感兴趣的可能位置,诸如狭窄和/或血管树的位置。规则不改变中心线或管腔分割;它们仅仅定义了模拟的支持、边界条件所应用的位置以及边界条件模型的解剖学参数。

[0041] 标准化参数对于所有群体能够是固定的,并通过整个训练群体上的优化过程从某个范围中来选择。备选地,能够通过使用患者性质从针对每个患者的范围来个性化标准化参数,所述患者性质包括但不限于人口统计和/或解剖学患者性质,诸如患者性别、体重、年龄、心脏尺寸。

[0042] 利用一种FFR-CT方法,修剪规则206优化集总模型管道的FFR-CT预测,使得它们尽可能准确。例如,修剪规则206优化Nickisch等人的“Learning Patient-Specific Lumped Models for Interactive Coronary Blood Flow Simulations”(MICCAI 2015,第433-441页)的集总模型管线的FFR-CT预测。修剪规则206还可以优化集总模型管线的其他FFR-CT预测。根据经验,修剪规则204减少了用户对模拟的依赖性并提高了集总模型管线的准确性。本文还预期了其他模拟,包括不使用集总模型的其他FFR-CT。例如,本文预期了诸如有限元、有限体积、有限差别的基于网格的模拟,以及诸如粒子方法或格子玻尔兹曼的无网格方法,和/或其他方法。

[0043] 图3示出了例如由分割器118输出的经分割的冠状动脉树。图4示出了在分割标准化器120将修剪规则204应用于图3的经分割的冠状动脉树之后的标准化的经分割的冠状动脉树。在该范例中,规则产生血管302、304、306、308、310、312、314、316和318的修剪端部。图4示出了在端部被修剪的沿着血管302、304、306、308、310、312、314、316和318的点处定位的

修剪标记402、404、406、408、410、412、414、416和418。在变型中,经修剪的部分能够变灰和/或以其他方式标记。

[0044] 图5示意性图示了在其中生物物理模拟器122是FFR指数确定器的范例。FFR指数确定器122接收标准化血管树(例如,图4)作为输入。

[0045] FFR指数确定器122包括边界条件估计器502,边界条件估计器502被配置为估计标准化血管树的一个或多个边界条件。例如,边界条件估计器502可以确定和/或接入口流率 Q_o (即,窦口处的流率),其能够基于诸如对象体重、身体质量指数(BMI)、性别、年龄、血液测试结果的数据、解剖学成像数据(例如,心肌质量和估计的每搏输出量)和/或对象数据,以及标准化血管树的几何结构(例如,窦口处的直径 D_o)来生成。由此,边界条件估计器502估计在血管出口处的至少一个边界条件,诸如流率 Q_o 、平均速度和/或阻力。

[0046] 以非限制性范例的方式,在一个实例中,边界条件估计器502将出口处的流率边界条件 Q 估计为 Q_o 和 D_o 的函数,如 $Q = Q_o \left(\frac{D}{D_o}\right)^{\frac{7}{3}}$,其中,D是每个出口处的有效直径,并且将平均速

度估计为 $v = \frac{\pi}{4} K D^{\frac{1}{3}}$,其中,K是血管长度与直径的比率,并且将阻力边界条件估计为 $R \triangleq \frac{P}{Q}$,其中,针对健康血管, $P_o \cong P$,其中, P_o 是窦口的主动脉压,其能够通过测量肱动脉血压来确定,健康组织的阻力 R_h 能够确定为 $R_h \cong \frac{P_o}{Q_o \left(\frac{D}{D_o}\right)^{\frac{7}{3}}}$ 。

[0047] FFR指数确定器122还包括标准化血管树处理器504,准化血管树处理器504使用边界条件对标准化血管树执行计算流体动力学(CFD)模拟,并且基于CFD结果来确定FFR。CFD的输出包括压力和速度的体积信息,并且基于此计算FFR。例如,FFR被计算为狭窄病变远端的最大血流(P_d)与相同血管中的正常最大血流(P_a)的比率,或 $FFR = P_d/P_a$ 。另一种合适的方法在Nikisch等人的“Learning Patient-Specific Lumped Models for Interactive Coronary Blood Flow Simulations”(2015年的MICCAI 2015,第II部分,LNCS 9350,第433-441页)中进行了描述。

[0048] 图6示出了显示带有模拟结果(例如,以灰度级)的标准化血管树(图5)的范例显示输出,所述模拟结果叠加或覆盖在血管302、304、306、308、310、312、314、316和318上面。在该范例中,修剪标记402、404、406、408、410、412、414、416和418被示出为显示血管302、304、306、308、310、312、314、316、318被修剪的点。这允许用户查看执行任何修剪的位置。在变型中,不显示修剪标记。在图6中,没有针对血管的修剪掉的部分(即修剪制造器402-418远端的部分)的模拟结果,所述修剪掉的部分没有被显示。

[0049] 图7基本上类似于图5,除了FFR指数确定器122还包括经修剪的血管段处理器602。经修剪的血管段处理器602被配置为使用基于标准化血管树处理器504的输出的边界条件来确定针对血管的经修剪的部分的FFR值。经修剪的血管段处理器602将流模拟扩展到标准化血管树的初始模拟域(例如,图4)之外。在一个实例中,经修剪的血管段处理器602利用集总参数模型,如下所述。然而,如本文所述,本文还预期其他方法,诸如网格、无网格等。

[0050] 图9中示出了合适的集总参数模型的范例。该范例包括n个元件和包括接地的m个节点,其中n和m是正整数。基于中心线表示,设立具有非线性阻力的集总模型。黑框指示流入和流出边界条件。表示树段传递函数 $\Phi(f)$ 的白色管包括反映局部血管几何结构和液压

效应两者的一系列线性和非线性阻力元件。由此,经修剪的血管段处理器602将血管的经修剪的部分考虑为非线性液压阻力元件的序列。

[0051] 针对经修剪的血管的延续,检索或读取修剪位置(修剪标记402-418)处的经修剪的模拟的体积流率和绝对压力。这些值用作用于后续模拟的初始值,所述后续模拟仅包括修剪位置远端的经修剪的部分。对于没有分支点的血管,流跨血管是恒定的。模拟是沿着经修剪的血管的局部传递函数的评价。

[0052] 在修剪掉整个子树的情况下,模拟整个液压网络(具有相应的入口条件)。在一个实例中,这包括求解非线性方程组以获得相应的流量和压力。非线性方程组的范例是:

$$[0053] \begin{bmatrix} A_R R^{-1} A_R^T & A_P \\ A_P^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ f_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_F \hat{f}_F \\ \hat{P}_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -A_V \varphi^{-1}(A_V^T q) \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0054] 其中,A表示节点到元件的矩阵,下标R、P、F和V分别指示阻力器、压力源、流量源和变阻器,R是对角线阻力矩阵, \hat{f}_F 和 \hat{P}_P 是包含压力/流量源参数的向量, φ^{-1} 是堆积到向量中的逆变阻器传递函数,q包含相对于接地节点的绝对压力,并且 f_p 表示在压力源处的体积流量。合适的一组出口边界条件包括使用群体缩放定律的阻力或出口流量。

[0055] 当在修剪过程中完全移除子树或血管并且子树或血管从另一个血管分支时,则没有剩余流并且零值被分配,并且因此,沿着整个子树分配恒定压力和恒定FFR值。除此之外的一切都将需要一种方式来确定主要流的哪一部分将通过子树或血管,并最终将需要经修剪的域上的模拟结果的修改。

[0056] 图8示出了范例显示输出,其示出了具有经修剪的部分和模拟结果的标准化血管树(图6),因此其(以灰度级)叠加或覆盖在血管302、304、306、308、310、312、314之上。在该范例中,再次示出修剪标记402、404、406、408、410、412、414、416和418,以示出血管302、304、306、308、310、312、314、316和318被修剪的点。在变型中,不显示修剪标记。

[0057] 本文描述的方法允许进行标准化患者特异性生物物理模拟,其中,标准化不受分割标准化器120的硬修剪的约束。例如,将缩减域上的计算结果用作起点,并且然后后续添加整个域的单独部分的结果,而不修改缩减域上的结果。

[0058] 图10图示了范例方法。应当意识到,上述动作的顺序不是限制性的。因此,本文预期其他排序。另外,可以省略一个或多个动作和/或可以包括一个或多个额外的动作。

[0059] 在1002处,从体积图像数据(例如,CT)分割血管树。

[0060] 在1004处,标准化经分割的血管树,如本文所述和/或其他方式。例如,能够基于预定的一组修剪规则来标准化经分割的血管树,所述预定的一组修剪规则是诸如结合图2所描述的那些修剪规则,其修剪掉经分割的血管树的特定血管的特定部分。

[0061] 在1006处,对标准化的经分割的血管树执行生物物理模拟。

[0062] 在1008处,经由显示监测器视觉地显示结果(例如,标准化的经分割的血管树和FFR指数)。

[0063] 图11图示了另一范例方法。应当意识到,上述动作的顺序不是限制性的。因此,本文预期其他排序。另外,可以省略一个或多个动作和/或可以包括一个或多个额外的动作。

[0064] 在1102处,从体积图像数据(例如,CT)分割血管树。

[0065] 在1104处,标准化经分割的血管树,如本文所述和/或其他方式。例如,能够基于

预定的一组修剪规则来标准化经分割的血管树,所述预定的一组修剪规则是诸如结合图2描述的那些修剪规则,其修剪经分割的血管树的特定血管的特定部分。

[0066] 在1106处,对标准化的经分割的血管树执行生物物理模拟。

[0067] 在1108处,对经修剪的部分执行生物物理模拟,如本文所述和/或其他方式。

[0068] 在1008处,经由显示监测器视觉地显示结果(例如,针对标准化的和经修剪的部分的经分割的血管树和FFR指数)。

[0069] 以上可以通过编码或嵌入在计算机可读存储介质上的计算机可读指令来实现,当由(一个或多个)计算机处理器执行时,所述计算机可读指令使(一个或多个)处理器执行所描述的动作。额外地或备选地,计算机可读指令中的至少一个由信号、载波或不是计算机可读存储介质的其他瞬态介质承载。

[0070] 已经参考优选实施例描述了本发明。在阅读和理解了前面的详细描述后,其他人可能会想到修改和变更。本发明旨在被构造为包括所有这些修改和变化,只要其落入权利要求或其等价方案的范围内。

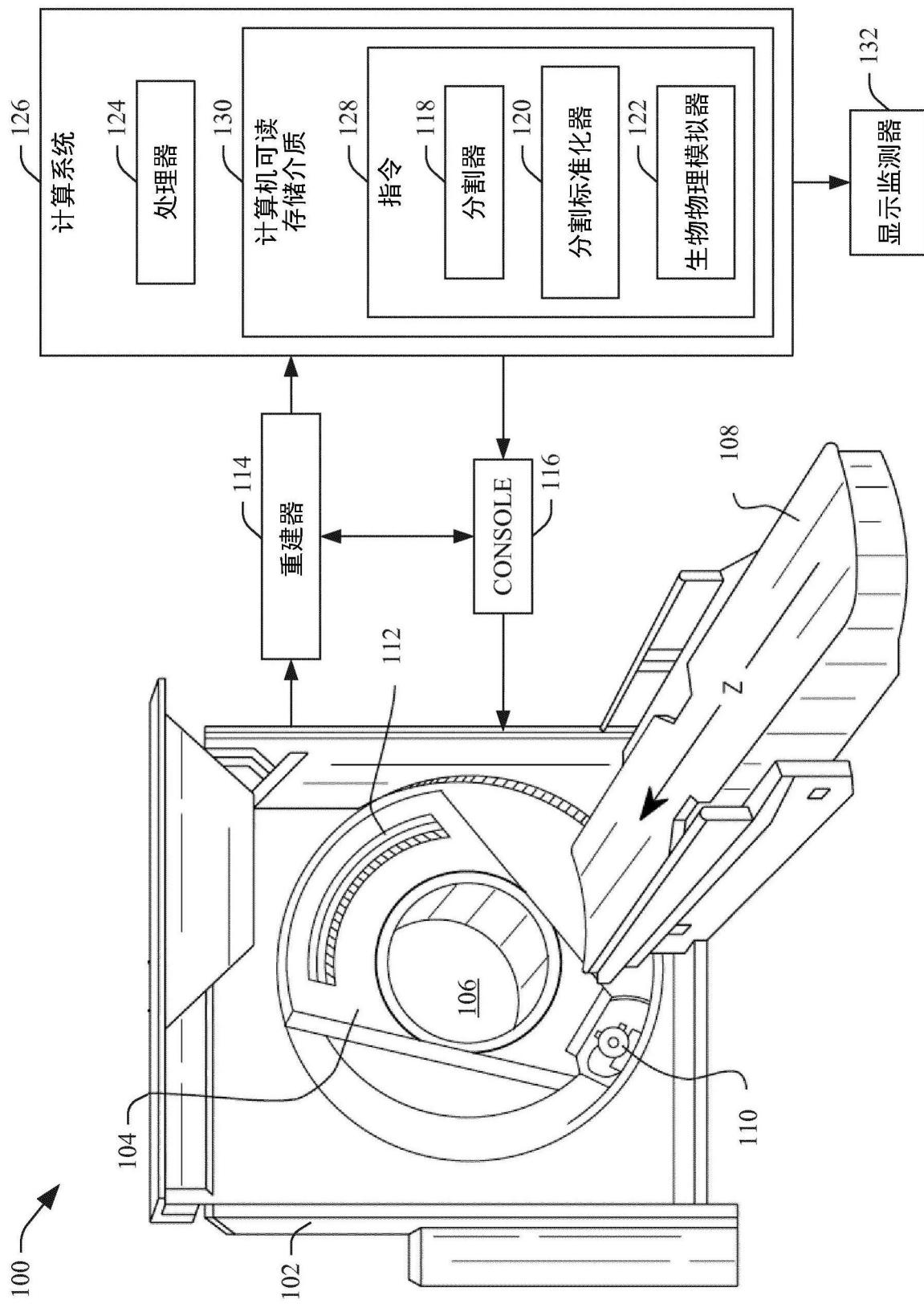


图1

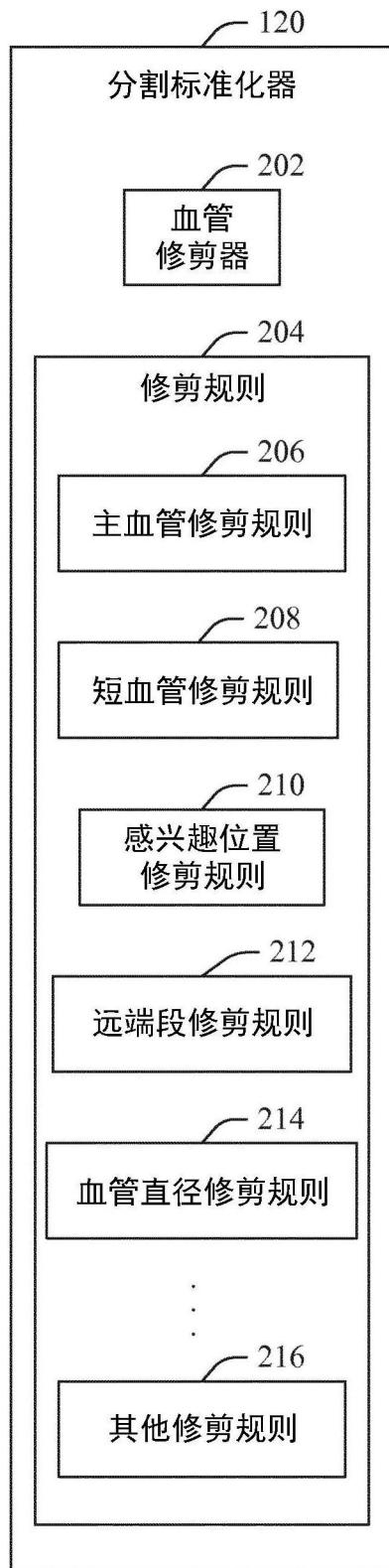


图2

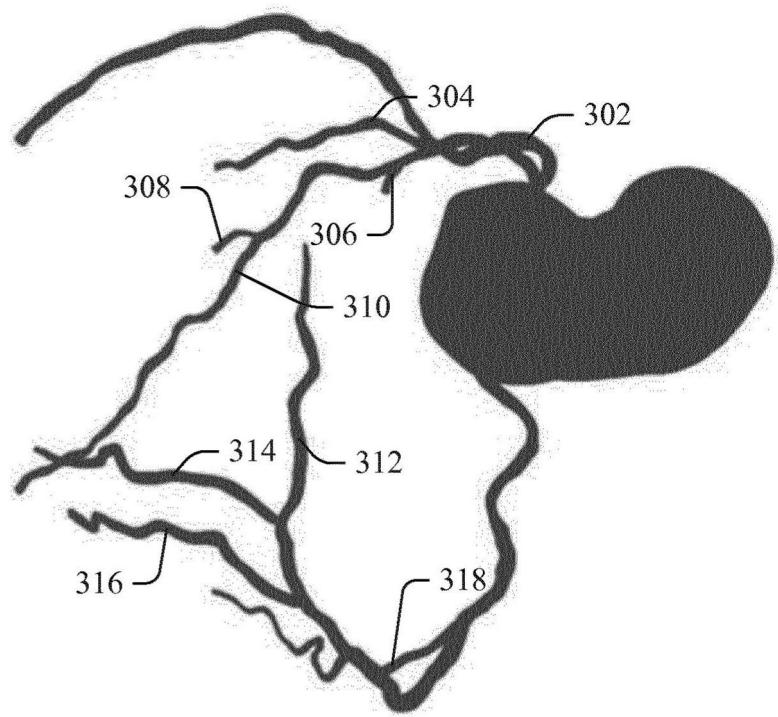


图3

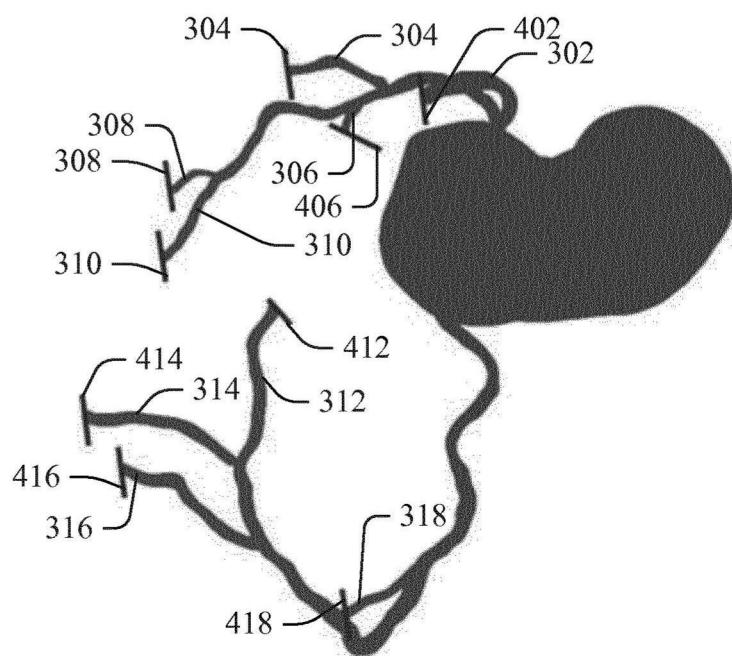


图4

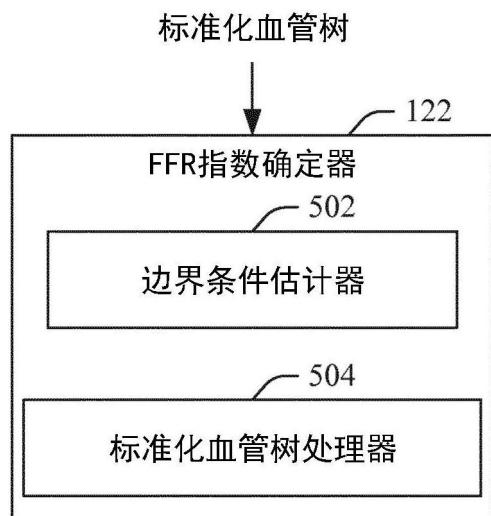


图5

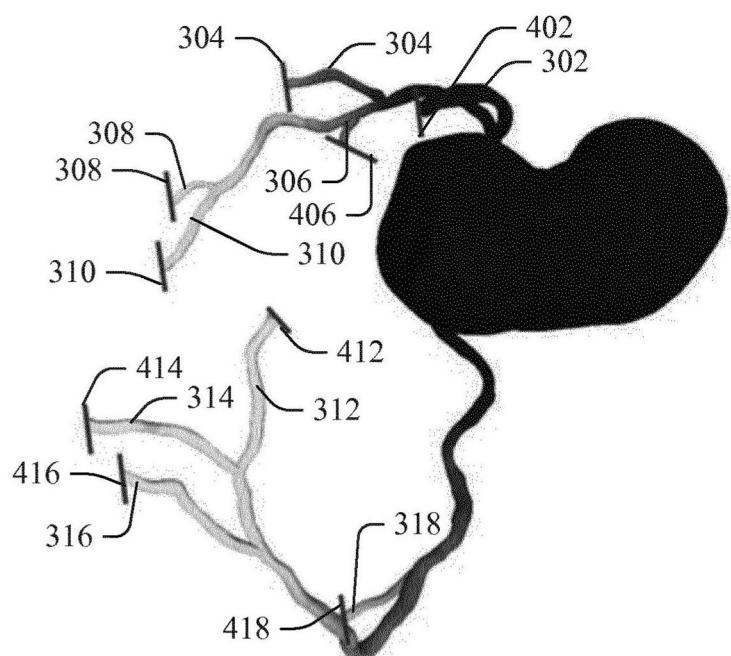


图6

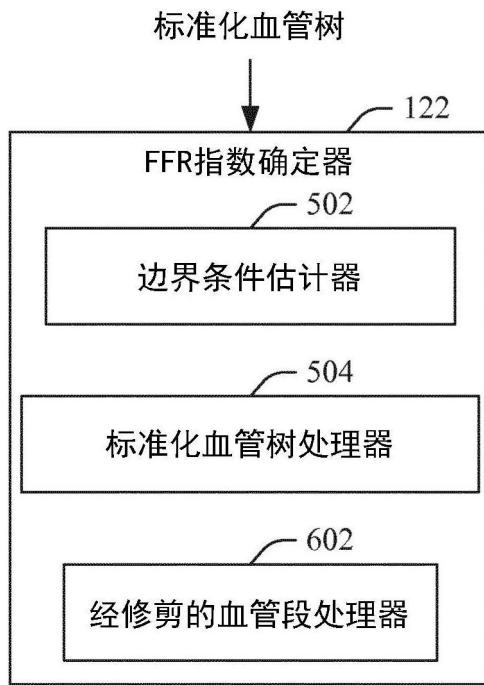


图7

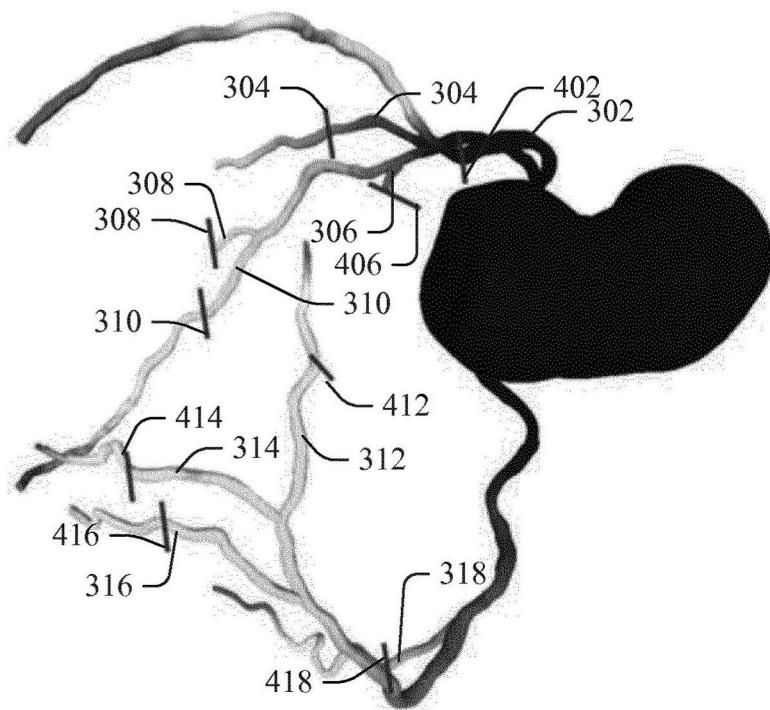


图8

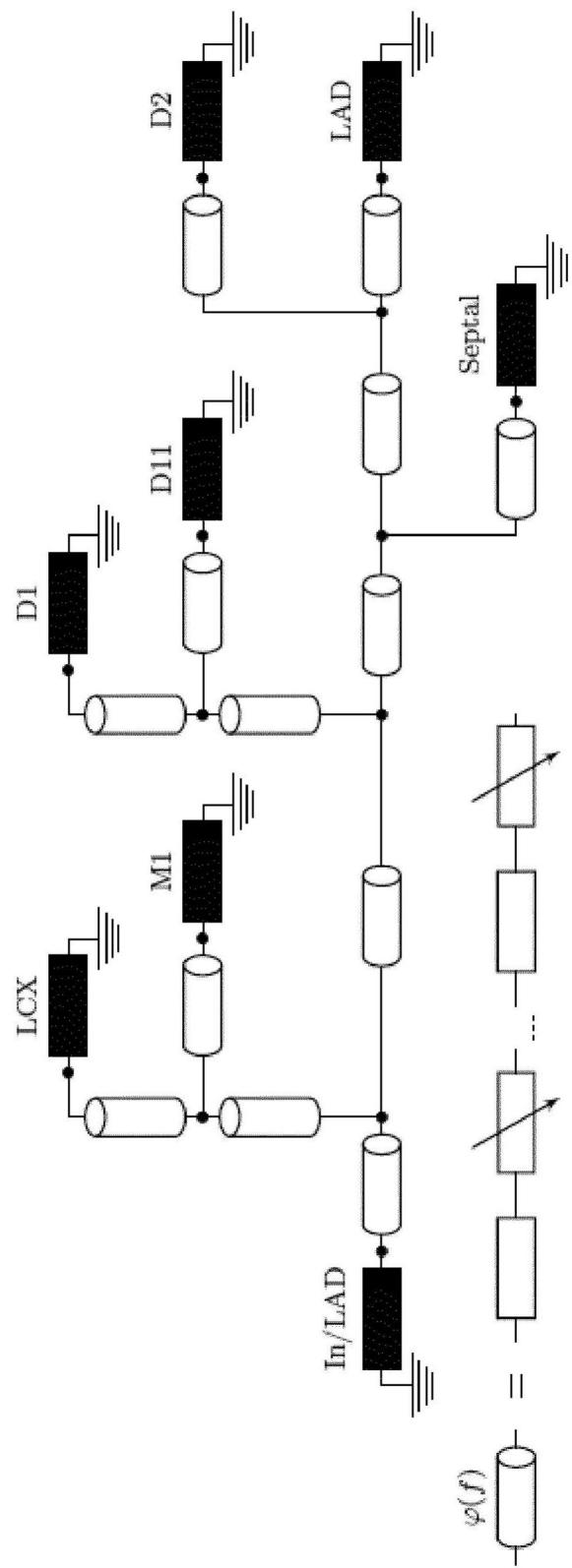


图9

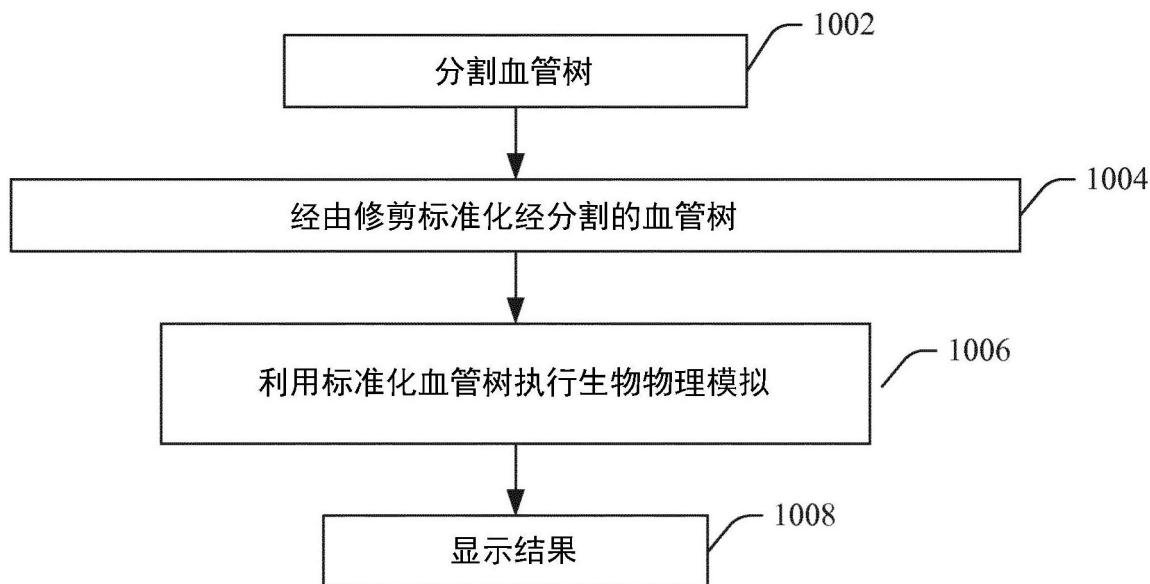


图10

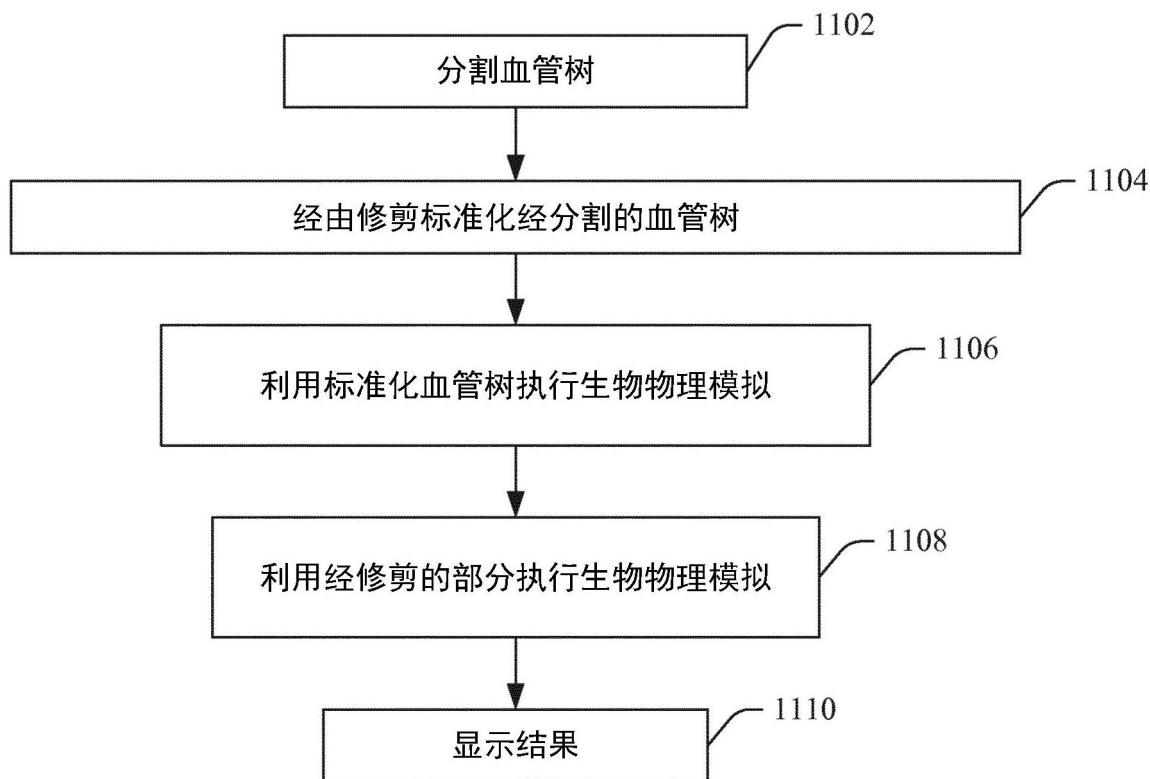


图11