



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110731771 A

(43)申请公布日 2020.01.31

(21)申请号 201910986542.3

(22)申请日 2019.10.17

(71)申请人 北京工业大学

地址 100124 北京市朝阳区平乐园100号

(72)发明人 乔爱科 张宏辉

(74)专利代理机构 北京思海天达知识产权代理有限公司 11203

代理人 刘萍

(51)Int.Cl.

A61B 5/026(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

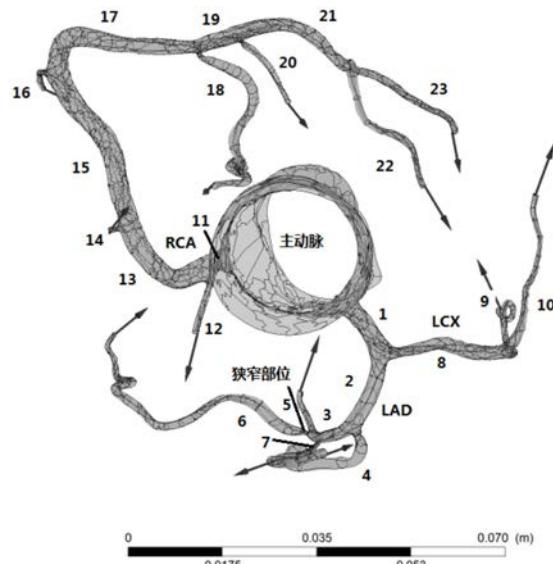
权利要求书4页 说明书7页 附图5页

(54)发明名称

一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法

(57)摘要

一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法，属于生物医学工程领域。运用心脏超声数据得到冠状动脉静息状态的流量。基于冠状动脉CT图像文件重建出冠状动脉三维模型并测量冠状动脉分支长度、体积和开口横截面积；然后根据冠状动脉分形系数和异速生长规律，建立基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法，结合冠状动脉狭窄段和无狭窄段对应阻力数学模型获得冠状动脉远端出口压力，通过流体动力学计算获得考虑狭窄作用的冠状动脉远端出口流量；最后依据冠状动脉最大充血状态流量是静息状态3倍的关系，获得最大充血状态冠状动脉远端出口流量，通过冠状动脉最大充血和静息状态血流量比值与阈值3比较，确定冠状动脉分支血流储备能力。



A

CN 110731771 A

1. 一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一,确定冠状动脉左前降支LAD、左回旋支LCX、右冠状动脉RCA的分形系数 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$;

依据CT图像重建冠状动脉模型,确定分支体积和长度;根据莫里原则和最小耗能定律,得到归一化长度与体积之间的指数关系,求得分形系数 ϵ_i ,这里 $i=1,2,3$;

步骤二,确定冠状动脉LAD、LCX、RCA流量:

运用心脏超声数据得到冠状动脉静息状态的流量,且流经LAD、LCX、RCA的流量分别与它们的分支长度成正比,根据步骤一中冠状动脉长度与体积的关系,以冠状动脉长度为中间量,建立冠状动脉LAD、LCX、RCA流量与体积之间的指数关系,确定LAD、LCX、RCA的流量;

步骤三,基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法:

在步骤二中得到的LAD、LCX、RCA流量基础上,依据冠状动脉分形系数和异速生长规律,得到冠状动脉分支开口横截面积与流量的关系,确定冠状动脉分支流量;

步骤四,确定冠状动脉分支对应阻力:

依据冠状动脉管径最小横截面积与参考横截面积比值来判断冠状动脉是否狭窄,当其比值小于1时,判定冠状动脉发生狭窄;若冠状动脉有狭窄段,则依据最狭窄处横截面积、狭窄长度、参考横截面积和分支流量,确定冠状动脉分支对应阻力;

若冠状动脉无狭窄段,则依据冠状动脉分支开口和出口横截面积的平均值和分支长度,并根据泊肃叶定律,确定冠状动脉分支对应阻力;

步骤五,确定冠状动脉分支出口压力并完成冠状动脉分支从静息到最大充血状态血流储备的无创计算:

通过冠状动脉分支流量与阻力的乘积得到冠状动脉分支对于流量产生的压力差;已知冠状动脉入口压力,将沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到的静息状态下冠状动脉分支出口压力作为出口边界条件,通过步骤二确定的静息状态下LAD、LCX、RCA流量为入口条件,通过将其施加到冠状动脉模型的流体动力学计算中,得到冠状动脉分支出口流量 Q_1 ,这里1取值为1-13;

对于冠状动脉最大充血状态的模拟,将静息状态下LAD、LCX、RCA流量的3倍作为各自的入口条件,通过步骤三和四的计算得出最大充血状态下冠状动脉分支流量和阻力,并将分支流量和阻力做乘积得到冠状动脉分支对于流量产生的压力差,已知冠状动脉入口压力,将沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到最大充血状态下冠状动脉分支出口压力作为边界条件进行流体动力学计算,随后确定冠状动脉分支出口流量 Q_j ,并与 Q_1 比较,这里1或j取值为1-13;

取冠状动脉分支最大充血与静息状态出口流量的比值来计算冠状动脉分支血流储备能力。

2. 按照权利要求1所述的一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法,其特征在于,依据莫里原则和最小耗能定律,确定冠状动脉分形系数:

依据CT图像获取冠状动脉分支长度和体积,并分别对其进行归一化处理:

冠状动脉体积的归一化: V/V_{sum}

冠状动脉长度的归一化: L/L_{sum}

其中V为冠状动脉分支体积,V_{sum}为冠状动脉分支及下游分支的体积之和,L为冠状动脉分支长度,L_{sum}为冠状动脉分支及下游分支的长度之和;

根据莫里原则和最小耗能定律,以L/L_{sum}为横坐标,V/V_{sum}为纵坐标,通过拟合归一化长度和体积的指数关系曲线,得到关于 ε_i 的拟合方程并求得分形系数 ε_i :

$$\frac{V}{V_{sum}} = \left(\frac{L}{L_{sum}} \right)^{\frac{5}{3-\varepsilon_i}} \quad (1)$$

其中i取1,2,3,分别对应LAD、LCX、RCA。

3.按照权利要求1所述的一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法,其特征在于,依据归一化冠状动脉长度和体积的指数关系,确定冠状动脉LAD、LCX、RCA流量:

因流经LAD、LCX、RCA的流量分别与它们的分支长度成正比:

$$Q_0 = KL_h \quad (2)$$

其中Q₀为冠状动脉流量,K为比例常数,由冠状动脉入口和末端压力差决定,h取LAD,LCX,RCA;

依据归一化冠状动脉长度和体积的指数关系,以冠状动脉长度为中间量,确定冠状动脉LAD、LCX、RCA的流量:

$$Q_{LAD} = \left(\frac{V_{LAD}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_1}{5}} Q_0, \quad Q_{LCX} = \left(\frac{V_{LCX}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_2}{5}} Q_0, \quad Q_{RCA} = \left(\frac{V_{RCA}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_3}{5}} \quad (3)$$

其中V_{LAD}、V_{LCX}和V_{RCA}分别为LAD、LCX和RCA体积,V_{sum}为冠状动脉总体积。

4.按照权利要求1所述的一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法,其特征在于,依据异速生长规律,且基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法,确定冠状动脉分支流量:

依据冠状动脉分形系数和异速生长规律,确定冠状动脉分支开口横截面积与流量的关系:

$$\frac{Q}{Q_{sum}} = \left(\frac{A}{A_{max}} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \quad (4)$$

其中Q为冠状动脉分支流量,Q_{sum}为冠状动脉分支及其下游流量之和,A为冠状动脉分支开口横截面积,A_{max}为冠状动脉主干分支近端横截面积;

若冠状动脉每一个任何分支口之前的开口横截面积为A₀,一般冠状动脉为二分支结构,沿着血流方向逐级分支,A₀分成两个一级分支A₁和A₂,然后一级分支分别分出两个两级分支A₁₁、A₁₂和A₂₁、A₂₂;若A₁没有分支,则A₁₁或A₁₂有一个是0;若A₂没有分支,则A₂₁或A₂₂有一个是0;若有A₁₁、A₁₂、A₂₁和A₂₂,则S₁、S₂、S₃和S₄分别对应A₁₁、A₁₂、A₂₁和A₂₂占A₀分支对应流量的比例;

若A₁₁、A₁₂、A₂₁和A₂₂进一步分支,则作为A₀或A₁、A₂再继续逐级分支,如此循环:

其中

$$\left. \begin{array}{l}
 S_1 = \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{11}}{A_1} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{12}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \\
 S_2 = \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{12}}{A_1} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{12}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \\
 S_3 = \left(\frac{A_2}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{21}}{A_2} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{21}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \\
 S_4 = \left(\frac{A_2}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{22}}{A_2} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{22}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}}
 \end{array} \right\} \quad (5)$$

若 S_{LAD-m} 、 S_{LCX-n} 、 S_{RCA-p} 分别为冠状动脉 LAD、LCX、RCA 各分支流量占 LAD、LCX、RCA 的流量比例, 则冠状动脉 LAD、LCX、RCA 各分支流量分别为:

$$\left. \begin{array}{l}
 Q_{LAD-m} = Q_0 \left(\frac{V_{LAD}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_1}{5}} S_{LAD-m} \\
 Q_{LCX-n} = Q_0 \left(\frac{V_{LCX}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_2}{5}} S_{LCX-n} \\
 Q_{RCA-p} = Q_0 \left(\frac{V_{RCA}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_1}{5}} S_{RCA-p}
 \end{array} \right\} \quad (6)$$

其中 S_{LAD-m} 、 S_{LCX-n} 、 S_{RCA-p} 沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支分配计算得到, 这里 m 或 $2, 3, 4, 5, 6, 7, n$ 或 $8, 9, 10, p$ 取值为 $11-23$ 。

5. 按照权利要求1所述的一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法, 其特征在于, 冠状动脉分支对于流量产生的阻力以压力差的方式加载到边界条件中, 完成冠状动脉流体动力学计算:

依据冠状动脉管径最小横截面积与参考横截面积比值来判断冠状动脉是否狭窄, 当其比值小于1时, 判定冠状动脉发生狭窄; 若冠状动脉有狭窄段, 根据狭窄最小横截面积、狭窄长度、参考横截面积和冠状动脉分支流量, 确定冠状动脉狭窄分支对应阻力:

$$R_1 = \frac{8\pi\mu L_1}{A_s^2} + \frac{1.5\rho}{2A_k^2} \left(\frac{A_k}{A_s} - 1 \right)^2 Q \quad (7)$$

其中 A_s 为最狭窄处横截面积, L_1 为狭窄长度, ρ 为血液密度, A_k 为参考横截面积;

若冠状动脉无狭窄段, 根据泊肃叶定律, 确定冠状动脉无狭窄分支对应阻力:

$$R_2 = \frac{8\pi\mu L_0}{A_w^2} \quad (8)$$

$$A_w = \frac{A_{in} + A_{out}}{2} \quad (9)$$

其中 μ 为血液粘度, L_0 为冠状动脉分支长度, A_w 为冠状动脉分支开口和出口横截面积的平均值, A_{in} 为冠状动脉分支开口横截面积, A_{out} 为冠状动脉分支出口横截面积;

根据冠状动脉分支流量与阻力的乘积, 得到冠状动脉分支对于流量产生的压力差; 当冠状动脉分支有狭窄时, 其产生压力差为 $\Delta P = Q(R_1 + R_2)$; 当冠状动脉分支无狭窄时, 其产生压力差为 $\Delta P = QR_2$;

已知冠状动脉入口压力, 根据冠状动脉分支对于流量产生的压力差, 沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到冠状动脉分支出口压力, 以冠状动脉 LAD、LCX、RCA 的流量为入口条件, 完成冠状动脉分支流体动力学计算。

6. 按照权利要求1所述的一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法, 其

特征在于,通过对冠状动脉分支在最大充血和静息状态出口流量进行比值,从而完成冠状动脉分支从静息到最大充血状态血流储备的无创计算:

已知静息状态下LAD、LCX、RCA流量为入口条件,通过冠状动脉分支流量与阻力的乘积将对于流量产生的阻力以压力差的方式加载到边界条件中,通过对冠状动脉分支进行流体动力学计算,得到冠状动脉分支出口流量 Q_1 ,这里1取值为1-13;

对于冠状动脉最大充血状态的模拟,以静息状态下LAD、LCX、RCA流量的3倍作为各自的入口条件,通过步骤三和四的计算得到最大充血状态下冠状动脉分支流量和阻力,并作乘积得到分支对于流量产生的压力差,在已知入口压力基础上,沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到最大充血状态下冠状动脉各分支出口压力,将得到的分支出口压力作为出口条件进行流体动力学计算,随后确定冠状动脉分支出口流量 Q_j ,并与 Q_1 比较,这里1或j取值为1-13;

若冠状动脉分支没有狭窄,则在静息与最大充血状态下冠状动脉分支血流储备能力为 $\frac{Q_j}{Q_1} = 3$;1或j取值为1-13;若冠状动脉分支有狭窄时,运用冠状动脉分支最大充血到静息状态出口流量的比值来计算冠状动脉分支血流储备能力。

一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法

技术领域

[0001] 本发明提出的一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法,属于生物医学工程技术领域,涉及一种从静息到最大充血状态无创计算冠状动脉分支血流储备能力的方法。

背景技术

[0002] 随着超声影像技术的发展,通过在静息和运动试验中心脏室壁运动情况对比,定性描述从静息到最大充血状态冠状动脉分支血流储备能力。常用的模拟冠状动脉最大充血状态方法包括运动负荷和药物负荷。

[0003] (1)运动负荷是通过踏车或者活动平板等以增加心肌耗氧的方式来模拟冠状动脉最大充血状态,通过在静息与最大充血状态下心脏室壁运动情况对比,定性描述从静息到最大充血状态冠状动脉分支血流储备能力。虽然运动负荷可以模拟冠状动脉最大充血状态,但其往往需要通过运动的方式使冠状动脉达到最大充血状态,这对于不能运动的来说,运动负荷模拟冠状动脉最大充血状态具有一定的局限性。

[0004] (2)药物负荷是通过注射血管扩张药等以扩张冠状动脉血管的方式来模拟冠状动脉最大充血状态。虽然对于不能运动的可通过药物负荷来模拟冠状动脉最大充血状态,但是其不能定量研究从静息到最大充血状态冠状动脉分支血流储备能力。

[0005] 虽然超声影像技术可无创评价冠状动脉分支血流储备能力,但是其不能定量研究从静息到最大充血状态冠状动脉分支血流储备能力。本发明从流体动力学方面研究冠状动脉血流情况,定量研究从静息到最大充血状态冠状动脉分支血流储备能力。

发明内容

[0006] 本发明已知冠状动脉静息状态的流量,基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法,将计算得到的冠状动脉分支流量与阻力作乘积以便确定冠状动脉分支对于流量产生的压力差,并将其施加到边界条件中,通过对冠状动脉模型进行流体动力学计算,得到冠状动脉分支出口流量。通过调整冠状动脉入口流量来模拟最大充血状态,并分别比较两种状态冠状动脉分支出口流量。通过冠状动脉分支最大充血与静息状态流量的比值,从而完成冠状动脉分支由静息到最大充血状态血流储备能力的无创计算。

[0007] 本发明已知冠状动脉静息状态的流量,基于冠状动脉体积和长度参数,运用莫里原则和最小耗能定理,得到冠状动脉模型分形系数。在分形系数基础上,依据异速生长规律和冠状动脉左前降支LAD、左回旋支LCX、右冠状动脉RCA的流量,基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法,并确定冠状动脉分支流量,基本步骤包括:(1)模型的获取:基于冠状动脉CT图像的DICOM格式原始数据,重建冠状动脉模型。(2)分形系数的确定:依据冠状动脉长度和体积,可得到归一化冠状动脉长度和体积的数据点,在莫里原则和最小耗能定律基础上,以归一化冠状动脉长度为横坐标,归一化冠状动脉体积为纵坐标,通过拟合归一化长度和体积的指数关系曲线,得到关于分形系数的拟合方程并求得分形系数。(3)冠状动脉

LAD、LCX、RCA流量的确定:已知冠状动脉的流量,依据冠状动脉长度和体积的指数关系及流经LAD、LCX、RCA的流量分别与它们的分支长度成正比,以冠状动脉分支长度为中间量,建立冠状动脉体积与LAD、LCX、RCA流量的关系,确定冠状动脉LAD、LCX、RCA的流量。(4)冠状动脉分支流量分配方法的确定:依据冠状动脉分形系数和异速生长规律,确定冠状动脉分支开口横截面积与流量的指数关系。(5)冠状动脉分支流量的确定:根据冠状动脉LAD、LCX、RCA的流量及基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法,确定冠状动脉分支流量。

[0008] 本发明将冠状动脉分支对于流量产生的阻力以压力差的方式加载到边界条件中,通过调整入口流量来模拟最大充血状态,并分别比较两种状态冠状动脉分支流量。通过最大充血与静息状态冠状动脉分支流量的比值,从而完成冠状动脉分支从静息到最大充血状态血流储备能力的无创计算,基本步骤包括:(1)基于泊肃叶定律、冠状动脉最狭窄处横截面积、狭窄长度及分支流量,确定冠状动脉分支对应阻力。(2)已知冠状动脉入口压力,通过冠状动脉分支流量与阻力的乘积,得到各分支对应压力差,沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算并确定各分支出口压力。(3)以静息状态冠状动脉LAD、LCX、RCA流量为入口条件,通过逐个分支计算的出口压力为出口条件,将静息状态下冠状动脉LAD、LCX、RCA流量的3倍作为最大充血状态入口条件并计算出相应出口压力,通过对两种状态进行流体动力学计算,得到静息和最大充血状态对应出口流量分别为 Q_1 和 Q_j (1或j取值为1-13)。(4)若冠状动脉分支没有狭窄,则在静息与最大充血状态下冠状动脉分支血流储备为 Q_j/Q_1 或3(1或j取值为1-13);若冠状动脉分支有狭窄时,运用冠状动脉分支最大充血到静息状态出口流量的比值来计算冠状动脉分支血流储备能力。若比值大于或等于阈值3时,说明冠状动脉分支血流储备能力较强,若比值小于阈值3时,说明冠状动脉分支血流储备能力较弱,从而完成冠状动脉分支从静息到最大充血状态血流储备能力的无创计算。

附图说明

[0009] 图1主动脉和冠状动脉模型俯视图,其中2-7代表冠状动脉LAD各分支,8-10代表冠状动脉LCX各分支,11-23代表冠状动脉RCA各分支,圆圈圈出的是冠状动脉狭窄部分,其位于冠状动脉LAD上。

[0010] 图2主动脉和冠状动脉模型主视图,其中outlet1-4代表冠状动脉LAD各分支出口,outlet5-6代表冠状动脉LCX各分支出口,outlet7-13代表冠状动脉RCA各分支出口。

[0011] 图3冠状动脉LAD模型,其中inlet为左冠状动脉入口,outlet 1-4为冠状动脉LAD各分支出口。

[0012] 图4冠状动脉LAD狭窄部位局部放大图,outlet 1-3为冠状动脉LAD狭窄上游分支,outlet 4为冠状动脉LAD狭窄下游分支。

[0013] 图5从静息到最大充血状态冠状动脉分支血流储备能力的无创计算流程图

具体实施方式

[0014] 下面参照本发明的流程示意图,对本发明的一个实施例进行详细阐述,以使本发明的优点和特征能更易于被本领域技术人员理解,从而对本发明的保护范围做出更为清楚明确的界定。

[0015] 实施例1

[0016] 1. 基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法。

[0017] 本发明利用冠状动脉分形系数和异速生长规律,得到冠状动脉分支开口横截面积与流量的指数关系式,沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到冠状动脉分支流量占上一级流量的比例,在已知冠状动脉LAD、LCX、RCA的流量基础上,确定冠状动脉各分支流量,基本步骤包括: (1) 模型获取: 基于冠状动脉CT图像的DICOM格式原始数据, 重建冠状动脉模型。 (2) 分形系数的确定: 依据冠状动脉体积和长度, 可得到归一化冠状动脉长度和体积的数据点, 在莫里原则和最小耗能定律基础上, 以归一化冠状动脉长度为横坐标, 归一化冠状动脉体积为纵坐标, 通过拟合归一化长度和体积的指数关系曲线, 得到关于分形系数的拟合方程并求得分形系数。 (3) 冠状动脉分支流量分配方法的确定: 依据冠状动脉分形系数和异速生长规律, 确定冠状动脉分支开口横截面积与流量的关系, 沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到冠状动脉分支流量占上一级流量的比例, 最后通过冠状动脉LAD、LCX、RCA的流量, 确定冠状动脉各分支流量。

[0018] 分形系数: 冠状动脉按照所供心肌的大小和范围进行分叉, 沿着一定分形系数分布以满足不同心肌不同位置和功能的代谢需要。

[0019] 归一化: 冠状动脉分支结构尺寸与冠状动脉分支及下游分支结构尺寸的比值。

[0020] 2. 从静息到最大充血状态冠状动脉分支血流储备能力的无创计算。

[0021] 已知静息状态下LAD、LCX、RCA流量作为入口条件, 基于泊肃叶定律、冠状动脉最狭窄处横截面积、狭窄长度及分支流量, 确定冠状动脉分支对应阻力。冠状动脉分支通过分支流量与阻力的乘积将对于流量产生的阻力以压力差的方式加载到边界条件中, 通过对冠状动脉模型进行流体动力学计算, 得到静息状态下冠状动脉分支出口流量 Q_1 , 这里1取值为1-13。

[0022] 对于冠状动脉最大充血状态的模拟, 以静息状态下LAD、LCX、RCA流量的3倍作为各自的入口条件, 通过的步骤三和四计算得到最大充血状态下冠状动脉分支流量和阻力, 并作乘积得到冠状动脉分支对于流量产生的压力差, 在已知入口压力基础上, 沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到最大充血状态下冠状动脉各分支出口压力, 将得到的分支出口压力作为出口条件进行流体动力学计算, 然后确定最大充血状态下冠状动脉分支出口流量 Q_j , 并与 Q_1 比较, 这里1或j取值为1-13。若冠状动脉分支没有狭窄, 则从静息到最大充血状态下冠状动脉分支血流储备能力为 Q_j/Q_1 或3 (1或j取值为1-13); 若冠状动脉分支有狭窄时, 运用冠状动脉分支最大充血到静息状态出口流量的比值来计算冠状动脉分支血流储备能力。若比值大于或等于阈值3时, 说明冠状动脉分支血流储备能力较强, 若比值小于阈值3时, 说明冠状动脉分支血流储备能力较弱, 从而完成冠状动脉分支从静息到最大充血状态血流储备能力的无创计算。

[0023] 一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

[0024] 步骤一, 确定冠状动脉左前降支LAD、左回旋支LCX、右冠状动脉RCA的分形系数 ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 ;

[0025] 依据CT图像重建冠状动脉模型, 确定分支体积和长度; 根据莫里原则和最小耗能定律, 得到归一化长度与体积之间的指数关系, 求得分形系数 ϵ_i , 这里 $i=1, 2, 3$;

[0026] 步骤二, 确定冠状动脉LAD、LCX、RCA流量:

[0027] 运用心脏超声数据得到冠状动脉静息状态的流量,且流经LAD、LCX、RCA的流量分别与它们的分支长度成正比,根据步骤一中冠状动脉长度与体积的关系,以冠状动脉长度为中间量,建立冠状动脉LAD、LCX、RCA流量与体积之间的指数关系,确定LAD、LCX、RCA的流量;

[0028] 步骤三,基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法:

[0029] 在步骤二中得到的LAD、LCX、RCA流量基础上,依据冠状动脉分形系数和异速生长规律,得到冠状动脉分支开口横截面积与流量的关系,确定冠状动脉分支流量;

[0030] 步骤四,确定冠状动脉分支对应阻力:

[0031] 依据冠状动脉管径最小横截面积与参考横截面积比值来判断冠状动脉是否狭窄,当其比值小于1时,判定冠状动脉发生狭窄;若冠状动脉有狭窄段,则依据最狭窄处横截面积、狭窄长度、参考横截面积和分支流量,确定冠状动脉分支对应阻力;

[0032] 若冠状动脉无狭窄段,则依据冠状动脉分支开口和出口横截面积的平均值和分支长度,并根据泊肃叶定律,确定冠状动脉分支对应阻力;

[0033] 步骤五,确定冠状动脉分支出口压力并完成冠状动脉分支从静息到最大充血状态血流储备的无创计算:

[0034] 通过冠状动脉分支流量与阻力的乘积得到冠状动脉分支对于流量产生的压力差;已知冠状动脉入口压力,将沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到的静息状态下冠状动脉分支出口压力作为出口边界条件,通过步骤二确定的静息状态下LAD、LCX、RCA流量为入口条件,通过将其施加到冠状动脉模型的流体动力学计算中,得到冠状动脉分支出口流量 Q_1 ,这里1取值为1-13;

[0035] 对于冠状动脉最大充血状态的模拟,将静息状态下LAD、LCX、RCA流量的3倍作为各自的入口条件,通过步骤三和四的计算得出最大充血状态下冠状动脉分支流量和阻力,并将分支流量和阻力做乘积得到冠状动脉分支对于流量产生的压力差,已知冠状动脉入口压力,将沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到最大充血状态下冠状动脉分支出口压力作为边界条件进行流体动力学计算,随后确定冠状动脉分支出口流量 Q_j ,并与 Q_1 比较,这里1或j取值为1-13;

[0036] 取冠状动脉分支最大充血与静息状态出口流量的比值来计算冠状动脉分支血流储备能力。

[0037] 依据莫里原则和最小耗能定律,确定冠状动脉分形系数:

[0038] 依据CT图像获取冠状动脉分支长度和体积,并分别对其进行归一化处理:

[0039] 冠状动脉体积的归一化: V/V_{sum}

[0040] 冠状动脉长度的归一化: L/L_{sum}

[0041] 其中 V 为冠状动脉分支体积, V_{sum} 为冠状动脉分支及下游分支的体积之和, L 为冠状动脉分支长度, L_{sum} 为冠状动脉分支及下游分支的长度之和;

[0042] 根据莫里原则和最小耗能定律,以 L/L_{sum} 为横坐标, V/V_{sum} 为纵坐标,通过拟合归一化长度和体积的指数关系曲线,得到关于 ϵ_i 的拟合方程并求得分形系数 ϵ_i :

$$[0043] \frac{V}{V_{sum}} = \left(\frac{L}{L_{sum}} \right)^{\frac{5}{3-\epsilon_i}} \quad (1)$$

- [0044] 其中i取1,2,3,分别对应LAD、LCX、RCA。
- [0045] 依据归一化冠状动脉长度和体积的指数关系,确定冠状动脉LAD、LCX、RCA流量:
- [0046] 因流经LAD、LCX、RCA的流量分别与它们的分支长度成正比:
- [0047] $Q_0 = KL_h$ (2)
- [0048] 其中 Q_0 为冠状动脉流量,K为比例常数,由冠状动脉入口和末端压力差决定,h取LAD,LCX,RCA;
- [0049] 依据归一化冠状动脉长度和体积的指数关系,以冠状动脉长度为中间量,确定冠状动脉LAD、LCX、RCA的流量:
- [0050]
$$Q_{LAD} = \left(\frac{V_{LAD}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_1}{5}} Q_0, \quad Q_{LCX} = \left(\frac{V_{LCX}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_2}{5}} Q_0, \quad Q_{RCA} = \left(\frac{V_{RCA}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_3}{5}} \quad (3)$$
- [0051] 其中 V_{LAD} 、 V_{LCX} 和 V_{RCA} 分别为LAD、LCX和RCA体积, V_{sum} 为冠状动脉总体积。
- [0052] 依据异速生长规律,且基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法,确定冠状动脉分支流量:
- [0053] 依据冠状动脉分形系数和异速生长规律,确定冠状动脉分支开口横截面积与流量的关系:

[0054]
$$\frac{Q}{Q_{sum}} = \left(\frac{A}{A_{max}} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \quad (4)$$

- [0055] 其中Q为冠状动脉分支流量, Q_{sum} 为冠状动脉分支及其下游流量之和,A为冠状动脉分支开口横截面积, A_{max} 为冠状动脉主干分支近端横截面积;
- [0056] 若冠状动脉每一个任何分支口之前的开口横截面积为 A_0 ,一般冠状动脉为二分支结构,沿着血流方向逐级分支, A_0 分成两个一级分支 A_1 和 A_2 ,然后一级分支分别分出两个两级分支 A_{11} 、 A_{12} 和 A_{21} 、 A_{22} ;若 A_1 没有分支,则 A_{11} 或 A_{12} 有一个是0;若 A_2 没有分支,则 A_{21} 或 A_{22} 有一个是0;若有 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 和 A_{22} ,则 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 分别对应 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 和 A_{22} 占 A_0 分支对应流量的比例;
- [0057] 若 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{21} 和 A_{22} 进一步分支,则作为 A_0 或 A_1 、 A_2 再继续逐级分支,如此循环:
- [0058] 其中

$$\left. \begin{aligned}
 S_1 &= \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{11}}{A_1} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{12}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \\
 S_2 &= \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{12}}{A_1} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{12}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \\
 S_3 &= \left(\frac{A_2}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{21}}{A_2} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{21}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \\
 S_4 &= \left(\frac{A_2}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} \left(\frac{A_{22}}{A_2} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}} = \left(\frac{A_{22}}{A_0} \right)^{\frac{2(3-\varepsilon_i)}{4-3\varepsilon_i}}
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

- [0060] 若 S_{LAD-m} 、 S_{LCX-n} 、 S_{RCA-p} 分别为冠状动脉LAD、LCX、RCA各分支流量占LAD、LCX、RCA的流量比例,则冠状动脉LAD、LCX、RCA各分支流量分别为:

$$\left. \begin{array}{l}
 Q_{LAD-m} = Q_0 \left(\frac{V_{LAD}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_1}{5}} S_{LAD-m} \\
 Q_{LCX-n} = Q_0 \left(\frac{V_{LCX}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_2}{5}} S_{LCX-n} \\
 Q_{RCA-p} = Q_0 \left(\frac{V_{RCA}}{V_{sum}} \right)^{\frac{3-\varepsilon_1}{5}} S_{RCA-p}
 \end{array} \right\} \quad (6)$$

[0062] 其中 S_{LAD-m} 、 S_{LCX-n} 、 S_{RCA-p} 沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支分配计算得到, 这里 m 或 $2, 3, 4, 5, 6, 7, n$ 或 $8, 9, 10, p$ 取值为 $11-23$ 。

[0063] 冠状动脉分支对于流量产生的阻力以压力差的方式加载到边界条件中, 完成冠状动脉流体动力学计算:

[0064] 依据冠状动脉管径最小横截面积与参考横截面积比值来判断冠状动脉是否狭窄, 当其比值小于1时, 判定冠状动脉发生狭窄; 若冠状动脉有狭窄段, 根据狭窄最小横截面积、狭窄长度、参考横截面积和冠状动脉分支流量, 确定冠状动脉狭窄分支对应阻力:

$$R_1 = \frac{8\pi\mu L_1}{A_s^2} + \frac{1.5\rho}{2A_k^2} \left(\frac{A_k}{A_s} - 1 \right)^2 Q \quad (7)$$

[0066] 其中 A_s 为最狭窄处横截面积, L_1 为狭窄长度, ρ 为血液密度, A_k 为参考横截面积;

[0067] 若冠状动脉无狭窄段, 根据泊肃叶定律, 确定冠状动脉无狭窄分支对应阻力:

$$R_2 = \frac{8\pi\mu L_0}{A_w^2} \quad (8)$$

$$A_w = \frac{A_{in} + A_{out}}{2} \quad (9)$$

[0070] 其中 μ 为血液粘度, L_0 为冠状动脉分支长度, A_w 为冠状动脉分支开口和出口横截面积的平均值, A_{in} 为冠状动脉分支开口横截面积, A_{out} 为冠状动脉分支出口横截面积;

[0071] 根据冠状动脉分支流量与阻力的乘积, 得到冠状动脉分支对于流量产生的压力差; 当冠状动脉分支有狭窄时, 其产生压力差为 $\Delta P = Q(R_1 + R_2)$; 当冠状动脉分支无狭窄时, 其产生压力差为 $\Delta P = QR_2$;

[0072] 已知冠状动脉入口压力, 根据冠状动脉分支对于流量产生的压力差, 沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到冠状动脉分支出口压力, 以冠状动脉LAD、LCX、RCA的流量为入口条件, 完成冠状动脉分支流体动力学计算。

[0073] 通过对冠状动脉分支在最大充血和静息状态出口流量进行比值, 从而完成冠状动脉分支从静息到最大充血状态血流储备的无创计算:

[0074] 已知静息状态下LAD、LCX、RCA流量为入口条件, 通过冠状动脉分支流量与阻力的乘积将对于流量产生的阻力以压力差的方式加载到边界条件中, 通过对冠状动脉分支进行流体动力学计算, 得到冠状动脉分支出口流量 Q_1 , 这里 1 取值为 $1-13$;

[0075] 对于冠状动脉最大充血状态的模拟, 以静息状态下LAD、LCX、RCA流量的3倍作为各自的入口条件, 通过步骤三和四的计算得到最大充血状态下冠状动脉分支流量和阻力, 并作乘积得到分支对于流量产生的压力差, 在已知入口压力基础上, 沿着血流方向从冠状动脉近端到远端逐个分支计算得到最大充血状态下冠状动脉各分支出口压力, 将得到的分支出口压力作为出口条件进行流体动力学计算, 随后确定冠状动脉分支出口流量 Q_j , 并与 Q_1 比较, 这里 1 或 j 取值为 $1-13$;

[0076] 若冠状动脉分支没有狭窄,则在静息与最大充血状态下冠状动脉分支血流储备能力为 $\frac{Q_j}{Q_l} = 3:1$ 或j取值为1-13;若冠状动脉分支有狭窄时,运用冠状动脉分支最大充血到静息状态出口流量的比值来计算冠状动脉分支血流储备能力。

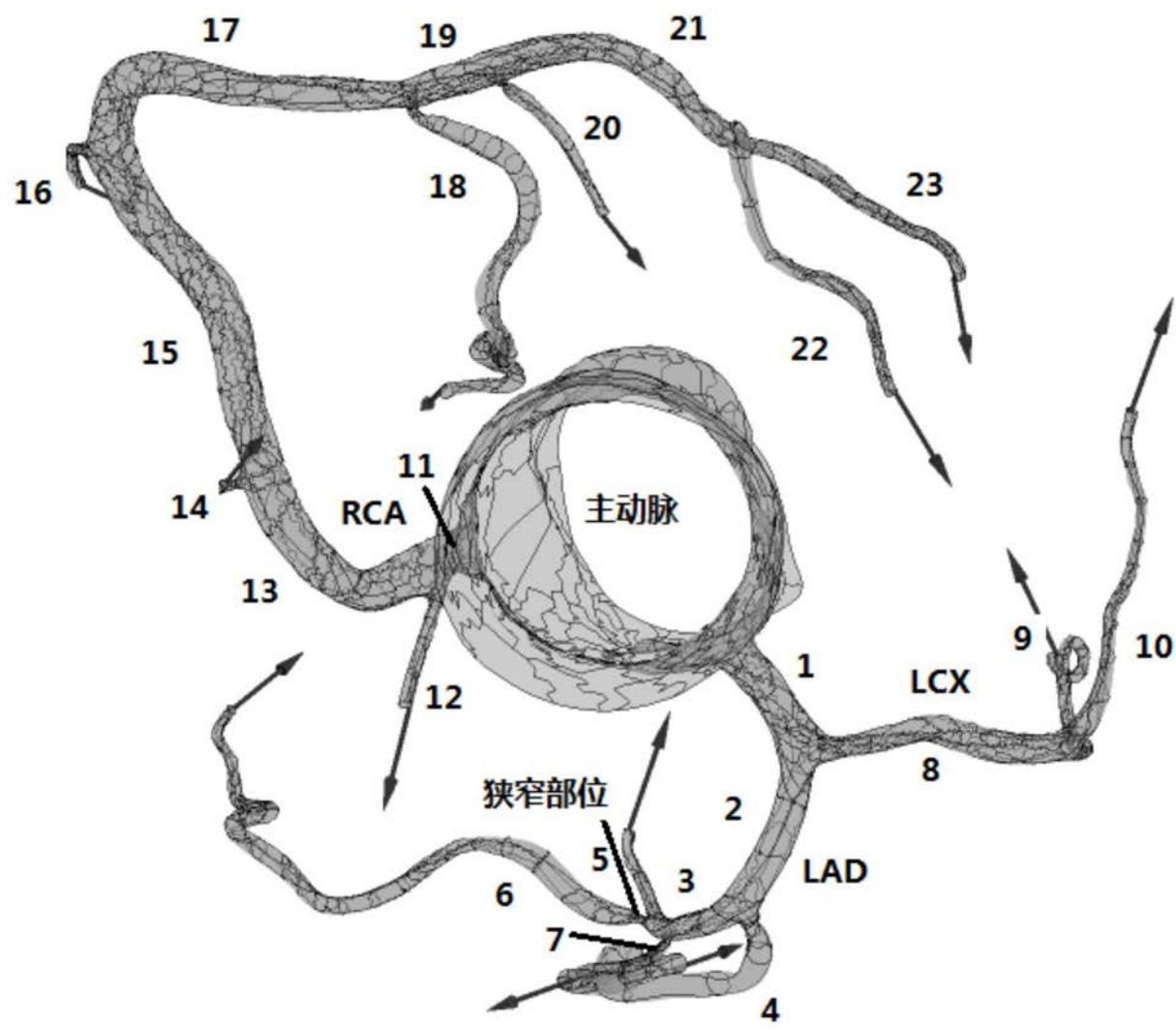


图1

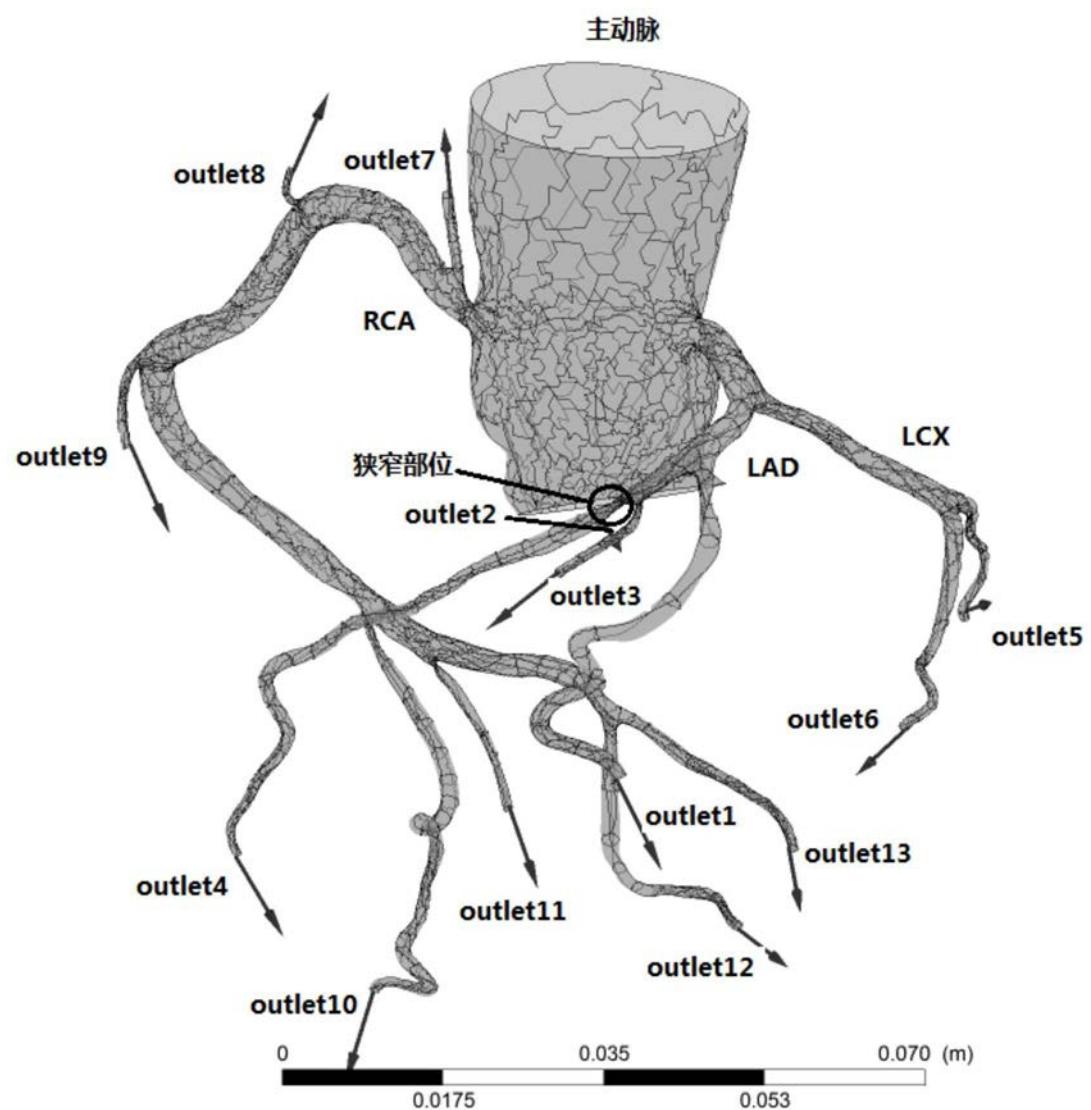


图2

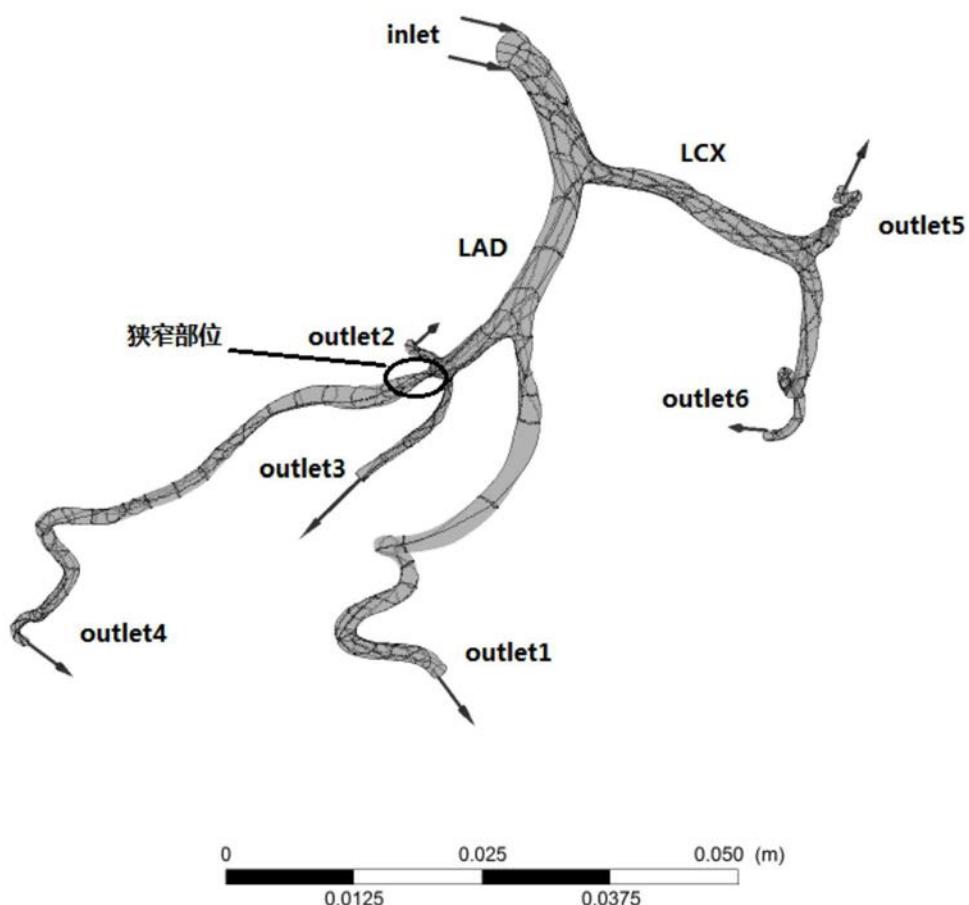


图3

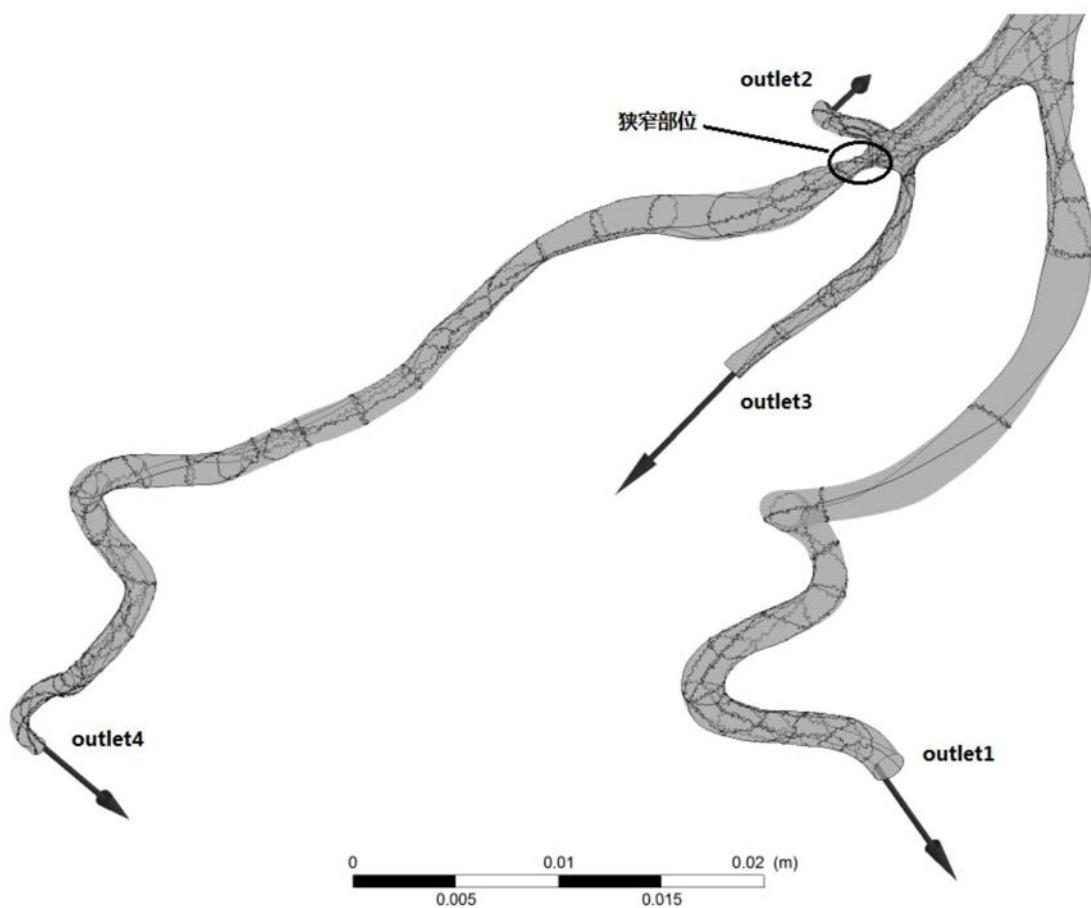


图4

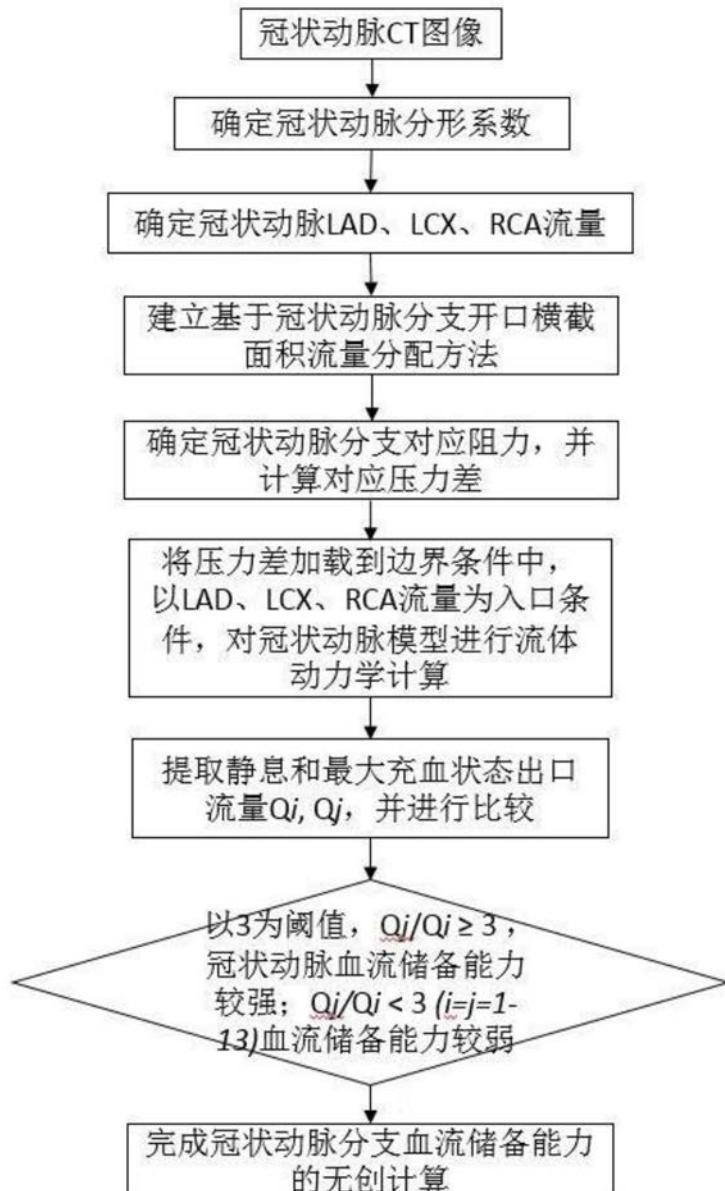


图5

专利名称(译)	一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法		
公开(公告)号	CN110731771A	公开(公告)日	2020-01-31
申请号	CN201910986542.3	申请日	2019-10-17
[标]申请(专利权)人(译)	北京工业大学		
申请(专利权)人(译)	北京工业大学		
当前申请(专利权)人(译)	北京工业大学		
[标]发明人	乔爱科 张宏辉		
发明人	乔爱科 张宏辉		
IPC分类号	A61B5/026 A61B5/00		
CPC分类号	A61B5/026 A61B5/72		
代理人(译)	刘萍		
外部链接	Espacenet Sipo		

摘要(译)

一种无创计算个性化冠状动脉分支血流储备能力的方法，属于生物医学工程领域。运用心脏超声数据得到冠状动脉静息状态的流量。基于冠状动脉CT图像文件重建出冠状动脉三维模型并测量冠状动脉分支长度、体积和开口横截面积；然后根据冠状动脉分形系数和异速生长规律，建立基于冠状动脉分支开口横截面积的流量分配方法，结合冠状动脉狭窄段和无狭窄段对应阻力数学模型获得冠状动脉远端出口压力，通过流体动力学计算获得考虑狭窄作用的冠状动脉远端出口流量；最后依据冠状动脉最大充血状态流量是静息状态3倍的关系，获得最大充血状态冠状动脉远端出口流量，通过冠状动脉最大充血和静息状态血流量比值与阈值3比较，确定冠状动脉分支血流储备能力。

