

病变血管内血流分布模型的研究进展

高莲¹, 张榆锋¹, 章克信², 许雷¹, 郭剑¹, 施心陵¹

(1. 云南大学信息学院电子工程系, 昆明 650091; 2. 昆明医学院第二附属医院, 昆明 650031)



摘要: 针对动脉狭窄或动脉瘤等病变血管中的血流动力学数值计算研究有助于了解血管内的血流状况、内部压力以及壁面剪切力分布的特点, 在血管疾病诊断及特征提取研究中具有广泛应用。考虑到病变血管特性、病灶几何形状、尺寸大小及血流分布的计算方法, 近年来, 研究者们从不同角度提出了多种血流分布模型。对其中的主要研究成果作了一个归纳总结, 阐述了各方法的基本原理和处理过程, 讨论了各自的优点、存在的局限性及未来可能的发展方向。

关键词: 血管狭窄; 动脉瘤; 血流分布; 仿真模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2014) 01-0146-06

Research Progress of Blood Flow Distribution Models in Diseased Vessels

GAO Lian¹, ZHANG Yu-feng¹, ZHANG Ke-xin², XU Lei¹, GUO Jian¹, SHI Xin-ling¹

(1. Department of Electronic Engineering, Information School, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. The Second Affiliated Hospital of Kunming Medical College, Kunming 650031, China)

Abstract: The computer simulation study of hemodynamic plays an important role in the fundamental understanding of the blood flow conditions, pressure gradient, and wall shear stress distribution in the stenotic vessels or aneurysmal arteries. In recently years, several models have been reported for computing the velocity distribution of the steady or pulsatile blood flow in the stenosed or aneurysmal vessels according to their different morphological feature. A general review of the main simulation models was proposed, and their principles, effects, limitations and possible developments in future were discussed.

Key words: stenosed vessel; aneurysmal artery; blood flow distribution; simulation model

引言

针对血管狭窄及动脉瘤等病变血管中的血流动力学数值计算模型研究有助于了解血管内的血流状况、内部压力以及壁面剪切力分布的特点, 在血管疾病诊断及特征提取研究中具有广泛应用^[1]。

建立病变血管内血流分布模型的一般过程为: 抽象化血管的病变特征, 建立病变血管几何模型, 最后计算血流速度、压力等血流动力学参数得到血流分布状况。研究发现, 病变血管中血流流动状况与血管及其病变组织特性、几何形状、尺寸大小密切相关^[2]。病变血管的几何模型是

基础, 决定了信号模型的适用范围; 血流速度、压力等血流动力学参数的获得是关键, 决定了所获得血流分布的真实性和可靠性。由于血管的构造和力学性质十分复杂, 在早期研究中为了分析方便, 往往将血管看作均质各向同性圆柱管^[3-6], 然后通过解析法^[3-5]或一维有限元方法^[6]求解血流控制方程得到正常(无病变)血管内血流分布信息。随着研究的不断深入, 有研究者根据临床成像设备及解剖统计获得的真实血管几何参数建立了有个体差异的血管几何模型^[7-12], 并使用计算流体动力学(CFD)等方法获得更真实的血流分布信息。

综合考虑病变血管特性、病灶几何形状、尺寸大小及血流分布的计算方法, 近年来, 为了研究狭窄及动脉瘤病变血管内血流动力学参数与血管病变程度之间的量化关系, 研究者们结合病变组织几何模型及流体力学等知识, 提出一系列病变血管内血流动力学计算模型。本文阐述了其中几种主要模型的基本原理和处理过程, 讨论了各自的

收稿日期: 2012-06-07

修回日期: 2012-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(61261007)及云南省自然科学基金重点项目(2013FA008)

作者简介: 高莲(1981-), 女, 云南人, 博士生, 研究方向为超声医学工程; 张榆锋(通讯作者)(1965-), 男, 云南人, 教授, 博导, 研究方向为超声医学工程、自适应信号处理等。

优点、存在的局限性及未来可能的发展方向。

1 狭窄血管内血流分布计算

在人体大、中动脉的一些部位,由于胆固醇和脂质物的沉积、积累形成了动脉粥样硬化,进而引起血管的局部狭窄,导致血流分布发生改变^[1-2]。目前狭窄血管血流分布的计算模型根据血管及病变组织几何形状主要包括针对直管狭窄和弯曲分叉狭窄两类血管。

1.1 直管狭窄血管内血流分布计算

人体血管中狭窄斑块多表现为偏心斑块,并有表面不规则,几何尺寸各异等特点,所以建立准确的狭窄血管个体化模型比较困难。针对直管血管,通常将狭窄斑块形状近似为理想的解析几何形状,如余弦形、同心环形、矩形及锥形等,其中余弦狭窄血管模型应用最为广泛。

(1) 余弦狭窄血管内血流分布计算

二维双边轴对称余弦狭窄血管模型如图1所示:

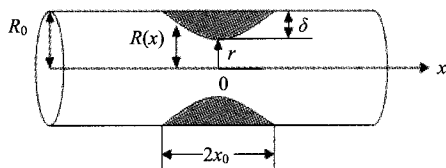


图1 轴对称的余弦形局部狭窄几何示意图

在此基础上,应用CFD^[13-15]、傅里叶级数展开法^[16]、近似求解法^[17-19]及摄动法^[20]等血流分布计算方法获得二维轴对称余弦狭窄血管中不同特性血流,如定常流^[13,17,19]、脉动流^[14,16,20]、Casson流^[15]及Carreau非牛顿血流^[18]的速度分布。

此外,Tang^[21]等通过CFD方法获得二维非轴对称余弦狭窄血管内血流及管壁的流体力学特征,并研究了血流与管壁运动的相互作用。Paul等^[22-23]借助大涡模拟方法^[22]及CFD方法^[23]研究了三维余弦狭窄血管内脉动非旋血流及加旋血流分布的区别。

(2) 同心环形狭窄血管内血流分布计算

同心环形狭窄血管内狭窄斑块呈环形,如图2所示:

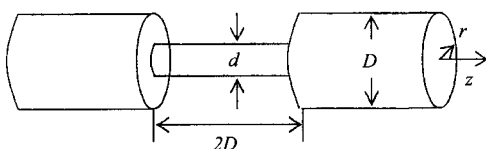


图2 同心环形狭窄血管几何示意图

张羽等^[17]通过迭代法求解涡度-流函数方程获得高狭

窄血管中定常层流的速度分布。而Belzacq等^[24]使用Comsol软件求解任意拉格朗日—欧拉(ALE)方程获得不同程度同心环形狭窄血管内黏性不可压缩脉动血流速度及管壁位移。

(3) 矩形狭窄血管内血流分布计算

矩形狭窄血管几何模型如图3所示:

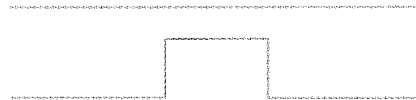


图3 非轴对称局部矩形狭窄血管几何示意图

Oung等^[25]使用有限元技术求解Navier-Stokes方程得到50%非轴对称刚性矩形狭窄血管中的脉动非轴向血流速度分布。

(4) 锥形狭窄血管内血流分布计算

为了研究削锥几何特性狭窄斑块对血液流动的影响,Akbar等^[26-29]建立了锥形狭窄血管模型,如图4所示:

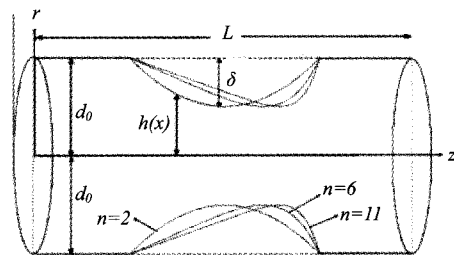


图4 锥形局部狭窄血管几何示意图

然后使用扰动方法^[26-28]及解析法^[29]获得锥形狭窄血管中可变粘性Jeffrey血液^[26-27]、Reiner-Rivlin血液^[28]及幂率型非牛顿血液^[29]的速度分布,并进一步研究了Reiner-Rivlin血液热与质量转换问题及Jerry流体的松弛时间和延迟时间对血液流动的影响。

上述几种基于理想化解析几何形状的狭窄直管几何模型的血流分布计算方法只用于研究局部狭窄形状简单规则的血管内血流分布特征,一旦管内狭窄形状发生改变,这些模型不再适用。比较而言,同心环形及矩形狭窄血管建模过程简单;但狭窄血管从无狭窄到狭窄产生的过渡为非连续的,与实际情况不符。余弦形和锥形狭窄血管模型与实际更接近,因此应用也更为广泛。而在血流分布的计算中,解析法无法获得脉动血流动力学参数;扰动方法无法获得大、中血管内非稳态血流动力学参数;CFD及其常用的有限元技术可通过数值模拟形象地再现不同几何特性血管内脉动血流状况,因其计算灵活性及精度较高而广泛应

用,但计算复杂度和运算量也最高。

1.2 弯曲分叉狭窄血管内血流分布计算

由于直管狭窄血管的理想几何模型是在一定简化基础上构造出来的,一些血管的局部几何特征(如弯曲、分叉及斑块的不同形态特征等)被忽略,从而导致与这些局部几何特征相联系的血流流动特征无法在仿真信号中反应出来。因此,有研究致力于建立几何形状较为复杂的具有弯曲或分叉特性的狭窄血管模型^[30-34],其中以Khoshniet等^[31-33]及Balocco等^[34]的研究最具代表性。

Khoshniet 等^[31-33]在总结了临床上颈动脉分叉处狭窄血管几何特征的基础上,构造了颈动脉分叉狭窄血管的几何模型,如图 5 所示。然后使用 CFD 获得血管采样子空间表面血流速度分布,并进一步使用快速几何搜索算法获得采样子空间内各散射对象(红细胞)的速度。

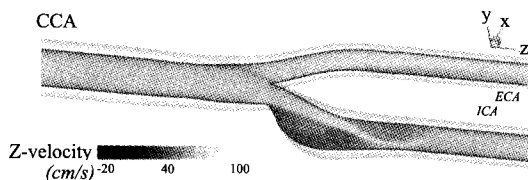


图5 狭窄颈动脉几何示意图

Balocco等^[34]建立了直立广义圆柱体血管模型,使用有限元分析软件(COMSOL)数值求解非线性Navier-Stokes方程得到复杂几何形状血管(正常、狭窄、分叉及弯曲)中不可压缩血流速度分布及压力梯度。

上述血管模型几何形状复杂,构造困难,无法用解析法获得血流动力学参数。因此使用 CFD 或有限元分析工具数值求解血流动力学方程是较好的解决方法,但计算量大,需要高性能的硬件及较长的计算处理时间。

2 动脉瘤血管内血流分布计算

动脉瘤是指动脉血管局部退化扩张,其持续膨胀增大可致使瘤壁破裂,最终导致病人死亡^[35]。而瘤壁破裂的主要原因是内壁承受的压力和剪切力超过了瘤壁的承受能力。绝大多数动脉瘤血管血流动力学数值计算研究都是基于数学上理想化的规则模型,如二维轴对称、二维非轴对称及三维非轴对称模型等^[35-42,46-47,57-60]。近年来,针对某类特定的病例,也有研究根据临床动脉瘤图像检测结果建立有个体差异的真实动脉瘤血管模型,在此基础上血流分布有助于更客观地评估动脉瘤破裂的风险,提高了动脉瘤血管内血流分布计算的临床实际应用。动脉瘤主要出现在腹主动脉及颅内动脉中,据此,本文分别总结腹主动脉瘤、

颅内动脉瘤及支架植入后动脉瘤血管内血流动力学计算模型。

2.1 腹主动脉瘤血流分布计算

在腹主动脉瘤研究领域,为了对动脉瘤内血流流动有一个基本的认识,早期研究主要集中于定常流情况^[36-38]下二维轴对称腹主动脉瘤模型内血流速度分布。为了获得三维腹主动脉瘤模型中血流流动状况,陆柳等^[39]解析求解 Navier-Stokes 方程得到定常流情况下血流分布。这类模型计算相对简单,但实验结果只能在一定程度上反映血液流动的平均效应,误差较大,无法反映真实血液运动状况。

随后,Viswanath 等^[40]、Finol 等^[41]和陆柳等^[42]分别使用近似求解法^[40,42]、谱元法^[41]得到脉动流情况下二维轴对称腹主动脉瘤模型内血流分布。Taylor 等^[43]和 Yu 等^[44]借助流体仿真软件(Fluent)详细数值分析了稳恒流和脉动流情况下三维腹主动脉瘤模型内血液流场变化并与使用数字粒子图像测速技术获得的实测结果进行比较研究。而后,蔡彦等^[45]根据动脉瘤影像学特点建立三维腹主动脉瘤模型并使用 CFD 得到脉动血流分布。这些计算模型得到了脉动情况下动脉瘤局部区域内血流动力学参数,反映了血液流动的瞬时效应;但计算比较复杂,计算量大,对实验的软硬件要求较高。

2.2 颅内动脉瘤血流分布计算

临床研究发现,常见的颅内动脉瘤按形状可为为分叉型和侧壁型两类,国内外分别对其进行了具有针对性的血流动力学数值计算研究。

在分叉型颅内动脉瘤研究中,Perktold^[46-47]等使用有限元方法研究了二维情况下动脉瘤区域内牛顿^[46]与非牛顿^[47]血流分布,发现在生理条件下将血液视为牛顿流体与非牛顿流体的研究结果基本相同。国内的符策基等人^[35]使用有限元分析软件(ANSYS)获得理想分叉管顶瘤二维模型中血流分布。戴建华等^[48]建立具有个体差异的真实分叉型颅内动脉瘤模型并结合 CFD 软件(Fluent)对动脉瘤内血液流动进行数值模拟,从而获得评估颅内动脉瘤破裂的更丰富信息。

在侧壁型颅内动脉瘤研究中,Burleson 等^[49]使用有限元方法获得二维直管旁瘤模型中不同尺寸的半球、球和梨状动脉瘤的血流分布、压力梯度及剪切力。研究发现在动脉瘤末端剪切力达到最大。Low 等^[50]通过数值求解 Navier-stokes 方程获得弯曲血管旁瘤在刚性血管壁和弹性血管壁两种情形下的三维动脉瘤模型中血流动力学参数。Cebal 等^[51]研究了基于真实动脉瘤图像建立的三维动脉瘤模型内血流动力学问题。国内的符策基等^[35]和温功碧等^[52]使用有限元^[35]及人工压缩性方法^[52]获得三维侧壁型颅内

动脉瘤模型中血液动力学参数, 并给出了这些参数在动脉瘤发展不同时期的特征。

2.3 支架植入后动脉瘤血流分布计算

随着生物材料技术的发展, 血管内支架植入技术在各种动脉瘤疾病的治疗中得到了越来越广泛的应用。与此同时, 国内外学者们对内支架植入后动脉瘤血流动力学也进行了深入研究。

Aenis 等^[53]借助有限元方法获得侧壁型直管旁瘤中植入血管内支架后瘤体区域血液流动分布。同时, Li 等^[54]和 Amblard 等^[55]分别通过解析法^[54]及有限元技术^[55]研究了腹主动脉瘤中植入血管内支架后血液流场变化情况。此外, 国内的乔爱科等^[56]使用 CFD 方法获得内支架治疗主动脉弓内侧面动脉瘤模型中脉动血流分布。上述研究表明, 内支架植入后动脉瘤内血流动力学参数与动脉瘤的几何形状、大小及其支架结构特征密切相关; 内支架植入后动脉瘤内血流动力学

的数值仿真有利于促进支架结构的完善及制作工艺的提高。

3 讨论

为了获得狭窄及动脉瘤等病变血管内血流动力学参数与血管病变程度之间的量化关系, 研究者基于病变血管抽象的数学几何模型, 使用血流分布计算方法(CFD、傅里叶级数展开法、近似求解法及摄动法等)获得血管内血流动力学参数。其中常见病变血管几何模型及血流分布计算方法的主要特点分别如表1及表2所示。与其它病变血管几何模型相比, 弯曲分叉狭窄血管和真实动脉瘤血管模型灵活性较强、适用范围广, 但建模过程复杂。与其它血流分布计算方法相比, 由于CFD方法不但可通过数值模拟获得血管内血流动力学参数, 而且还可通过图形成像、动画等方式显示动脉硬化斑块及动脉瘤形成、破裂过程, 所以CFD现已成为一种广泛使用的获得血管内血流动力学参数的方法。

表1 常见病变血管几何模型的主要特点

病变类型		形状	能否数学解析表达	灵活性	构建复杂度	适用范围
狭窄血管	直管狭窄	余弦狭窄 ^[13-23]	简单规则	能	差	简单 有限
		同心环形狭窄 ^[17,24]	简单规则	能	差	简单 有限
		矩形狭窄 ^[25]	简单规则	能	差	简单 有限
		锥形狭窄 ^[26-29]	简单规则	能	差	简单 有限
		弯曲分叉狭窄 ^[30-34]	复杂不规则	不能	强	复杂 广
动脉瘤血管	腹主动脉瘤 ^[36-45] 、	二维轴对称 ^{[35-38],[40-42],[46-47],[49]}	简单规则	能	差	简单 有限
	颅内动脉瘤 ^{[35],[46-52]} 、	三维非轴对称 ^{[39],[43-44],[50-52]}	简单规则	能	差	简单 有限
	支架植入后动脉瘤 ^[53-56]	真实 ^{[45],[48]}	复杂不规则	不能	强	复杂 广

表2 常见血流分布计算方法的主要特点

血流分布计算方法	计算复杂度	计算量	计算时间	硬件性能要求	计算方式	适用范围
CFD ^{[13-15],[21],[23-25],[31-35],[45],[48-53]}	高	大	长	较高	数值求解、 图形及动画模拟	各种几何形状(简单规则 及复杂不规则)病变血管
解析求解法	较CFD低	一般	较CFD短	较CFD低	数值求解	简单规则 几何形状病变血管
傅立叶级数展开法 ^[16] 、迭代法 ^[17] 、 近似求解法 ^{[17-19],[40],[42]} 、摄动法 ^[20] 、 大涡模拟法 ^[22] 、扰动方法 ^[26-28] 、 解析法 ^{[29],[49],[50]} 等						

今后, 随着研究的不断深入, 针对血管病变的不同类型及发展阶段, 综合考虑病变组织特性、出现部位、几何特征及发病机理等因素, 根据临床成像设备及解剖统计获得的真实病变血管几何参数来建立病变血管几何模型; 在此基础上使用CFD等数值模拟方法获得更逼真的血流分布信息; 并进一步借助相关的血流信号仿真合成方法, 有可能获得产生更具有疾病针对性的血流分布信息。

4 结论

近年来, 随着计算机技术的进步, 血流分布计算模型

获得了飞速发展, 出现了一批优秀的动脉狭窄或动脉瘤等病变血管中血流分布计算模型。本文对其中主要的仿真模型进行了系统地评述, 分析了各模型的优点及存在的局限性, 结论如下:

- (1) 建模的关键在于病变血管特性、病灶几何形状、尺寸大小及血流分布的计算方法, 其主要特点及适用范围如表1、表2总结所列。
- (2) 由于各种仿真模型各有利弊, 应根据实际的研究需求来选择合适的仿真模型;
- (3) 综合考虑病变组织特性, 并依据通过临床成像等途

径获得的真实病变血管几何参数来建立病变血管几何模型, 为病变血管内血流状况、内部压力以及壁面剪切力分布的研究提供更可靠的方法, 是未来研究发展的方向。

参考文献:

- [1] D H Evans, W N McDicken. Doppler Ultrasound: Physics, Instrumentation and Signal Processing [M]. Chichester, USA: Wiley, 2000.
- [2] Y M Hoi, S H Woodward, M Kim, *et al.* Validation of CFD Simulations of Cerebral Aneurysms with Implication of Geometric Variations [J]. Journal of Biomechanical Engineering (S0148-0731), 2006, 128(6): 844-851.
- [3] J A Jensen. Estimation of Blood Velocities Using Ultrasound: A Signal Processing Approach [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1996.
- [4] J A Jensen, P Munk. Computer Phantoms for Simulating Ultrasound B-mode and cfm Images [C]// 23rd Acoustical Imaging Symposium, Boston, Massachusetts, USA. Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1997, 23: 75-80.
- [5] J Fang, R G Owens. Numerical Simulations of Pulsatile Blood Flow using a New Constitutive Model [J]. Biorheology (S0006-355X), 2006, 43(5): 637-660.
- [6] S Canic, C J Hartley, D Rosenstrauch, *et al.* Blood Flow in Compliant Arteries: An Effective Viscoelastic Reduced Model, Numerics, and Experimental Validation [J]. Annals of Biomedical Engineering (S0090-6964), 2006, 34(4): 575-592.
- [7] K Azer, C S Peskin. A One-dimensional Model of Blood Flow in Arteries with Friction and Convection Based on the Womersley Velocity Profile [J]. Cardiovascular Engineering (S1567-8822), 2007, 7(2): 51-73.
- [8] A Swillens, T D Schryver, L Lovstakken, *et al.* Assessment of Numerical Simulation Strategies for Ultrasonic Color Blood Flow Imaging, Based on a Computer and Experimental Model of the Carotid Artery [J]. Annals of Biomedical Engineering (S0090-6964), 2009, 37(11): 2188-2199.
- [9] C S Kim, C Kiris, D Kwak, *et al.* Numerical Simulation of Local Blood Flow in the Carotid and Cerebral Arteries Under Altered Gravity [J]. Journal of biomechanical engineering (S0148-0731), 2006, 128(2): 194-202.
- [10] Y Ji, X Kang, D Liu. The Blood Flow at Arterial Bifurcations Simulated by the Lattice Boltzmann Method [J]. Chinese Physics Letters (S0256-307X), 2009, 26(7): 203-206.
- [11] S A Urquiza, P J Blanco, M J Venere, *et al.* Multidimensional Modelling for the Carotid Artery Blood Flow [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering (S0045-7825), 2006, 195: 4002-4017.
- [12] G Xiong, C A Figueroa, N Xiao, *et al.* Simulation of Blood Flow in Deformable Vessels using Subject-specific Geometry and Spatially Varying Wall Properties [J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering (S2040-7939), 2011, 27(7): 1000-1016.
- [13] X Fang, Y Wang, W Wang. Doppler Ultrasound Signals Simulation from Vessels with Various Stenosis Degrees [J]. Ultrasonics (S0041-624X), 2006, 44(S1): e173-e177.
- [14] B Buriev, T Kim, T Seo. Fluid-structure Interactions of Physiological Flow in Stenosed Artery [J]. Korea-Australia Rheology Journal (S1226-119X), 2009, 21(1): 39-46.
- [15] D S Sankar, U Lee. FDM Analysis for MHD Flow of a Non-Newtonian Fluid for Blood Flow in Stenosed Arteries. Journal of Mechanical Science and Technology (S1738-494X), 2011, 25(10): 2573-2581.
- [16] L Wang, Y Zhang, D Wang, *et al.* A Simulation Model for Doppler Ultrasound Signals from Pulsatile Blood Flow in Stenosed Vessels [C]// 2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics. USA: IEEE Computer Society Press, 2008: 339-343.
- [17] 张羽. 狭窄血管超声多普勒血流信息提取方法的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2003.
- [18] K H Sung, K C Ro, H S Ryou. Numerical Investigation on the Blood Flow Characteristics Considering the Axial Rotation in Stenosed Artery [J]. Korea-Australia Rheology Journal (S1226-119X), 2009, 21(2): 119-126.
- [19] R N Pralhad, D H Schultz. Modeling of Arterial Stenosis and its Applications to Blood Diseases [J]. Mathematical Biosciences (S0025-5564), 2004, 190(2): 203-220.
- [20] D S Sankar, K Hemalatha. Pulsatile Flow of Herschel-Bulkley Fluid through Stenosed Arteries—A Mathematical Model [J]. International journal of non-linear mechanics (S0020-7462), 2006, 41(8): 979-990.
- [21] D Tang, C Yang, S Kobayashi, *et al.* Effect of Stenosis Asymmetry on Blood Flow and Artery Compression: A three-dimensional Fluid-structure Interaction Model [J]. Annals of Biomedical Engineering (S0090-6964), 2003, 31(10): 1182-1193.
- [22] M C Paul, M M Molla, G Roditi. Large-Eddy Simulation of Pulsatile Blood Flow [J]. Medical Engineering & Physics (S1350-4533), 2009, 31(1): 153-159.
- [23] M C Paul, A Larman. Investigation of Spiral Blood Flow in a Model of Arterial Stenosis [J]. Medical Engineering & Physics (S1350-4533), 2009, 31(9): 1195-1203.
- [24] T Belzacq, S Avril, E Leriche, *et al.* A Numerical Parametric Study of the Mechanical Action of Pulsatile Blood Flow onto Axisymmetric Stenosed Arteries [J]. Medical Engineering & Physics (S1350-4533), 2012, 34(10): 1483-1495.
- [25] H Oung, F Forsberg. Doppler Ultrasound Simulation Model for Pulsatile Flow with Nonaxial Components [J]. Ultrasonic Imaging (S0161-7346), 1996, 18(3): 157-172.
- [26] N S Akbar, S Nadeem. Simulation of Variable Viscosity and Jeffrey Fluid Model for Blood Flow Through a Tapered Artery with a Stenosis [J]. Communications in Theoretical Physics (S0253-6102), 2012, 57(1): 133-140.
- [27] N S Akbar, S Nadeem, M Ali. Jeffrey Fluid Model for Blood Flow Through a Tapered Artery with a Stenosis [J]. Journal of Mechanics in Medicine and Biology (S0219-5194), 2011, 11(3): 529-545.
- [28] N S Akbar, S Nadeem. Simulation of Heat and Chemical Reactions on Reiner Rivlin fluid Model for Blood Flow through a Tapered Artery with a Stenosis [J]. Heat and Mass Transfer (S0947-7411), 2010, 46(5): 531-539.
- [29] S Nadeem, N S Akbar, A A Hendi, *et al.* Power Law Fluid Model for

- Blood Flow through a Tapered Artery with a Stenosis [J]. *Applied Mathematics and Computation* (S0096-3003), 2011, 217(17): 7108-7116.
- [30] Sarifuddin S Chakravarty, P K Mandal, *et al.* Numerical Simulation of Unsteady Generalized Newtonian Blood Flow through Differently Shaped Distensible Arterial Stenoses [J]. *Journal of Medical Engineering & Technology* (S0309-1902), 2008, 32(5): 385-399.
- [31] M Khoshniat, M Thorne, T Poepping, *et al.* Real-time Virtual Doppler Ultrasound [C]// *SPIE Medical Imaging* (ISBN: 9780819452832), San Diego, USA. USA: SPIE, 2004, 5373: 373-384.
- [32] M Khoshniat. Real-time Virtual Doppler Ultrasound [D]. Canada: University of Western Ontario, 2004.
- [33] S Hirji, D B Downey, D W Holdsworth, *et al.* Realtime and Interactive Virtual Doppler Ultrasound [C]// *SPIE Medical Imaging* (ISBN: 9780819457240). USA: SPIE, 2005: 127-138.
- [34] S Balocco, O Basset, J Azencot, *et al.* 3D Dynamic Model of Healthy and Pathologic Arteries for Ultrasound Technique Evaluation [J]. *Medical Physics* (S0094-2405), 2008, 35(12): 5440-5450.
- [35] 符策基. 颅内动脉瘤血液动力学的二维数值模拟[C]// 北京: 北京大学, 2000.
- [36] R Budwig, D Elger, H HooPer, *et al.* Steady Flow in Abdominal Aortic Aneurysm Models [J]. *Journal of Biomechanical Engineering* (S0148-0731), 1993, 115: 418-423.
- [37] C L Asbury, J W Ruberti, E I Bluth, *et al.* Experimental Investigations of Steady Flow in Rigid Models of Abdominal Aortic Aneurysms [J]. *Annals of Biomedical Engineering* (S0090-6964), 1995, 23(1): 29-39.
- [38] D Bluestein, L Niu, R T Schoepfoerster. Steady Flow in an Aneurysm Model: Correlation between Fluid Dynamics and Blood Plate Let Deposition [J]. *Journal of Biomechanical Engineering* (S0148-0731), 1996, 118(3): 280-286.
- [39] 陆柳, L Chua, S Yu. 腹主动脉瘤中定常流动的三维数值模拟[J]. *医用生物力学*, 2003, 18(2): 93-96.
- [40] N Viswanath, C M Rodkiewicz, S Zajac. On the Abdominal Aortic Aneurysms: Pulsatile State Considerations [J]. *Medical Engineering & Physics* (S1350-4533), 1997, 19(4): 343-351.
- [41] E A Finol, C H Amon. Blood Flow in Abdominal Aortic Aneurysms: Pulsatile Flow Hemodynamics [J]. *Journal of biomechanical engineering* (S0148-0731), 2001, 123(5): 474-484.
- [42] 陆柳, L Chua, S Yu. 非定常流动情况下 Womersley 数和 Reynolds 数对腹主动脉瘤流动的影响[J]. *医用生物力学*, 2003, 18(2): 87-92.
- [43] T W Taylor, T Yamaguchi. Three-dimensional Simulation of Blood Flow in an Abdominal Aortic Aneurysm-steady and unsteady Flow Cases [J]. *Journal of Biomechanical Engineering* (S0148-0731), 1994, 116(1): 89-97.
- [44] S C M Yu, W K Chan, B T H Ng, *et al.* A Numerical Investigation on the Steady and Pulsatile Flow Characteristics in Axi-symmetric Abdominal Aortic Aneurysm Models with some Experimental Evaluation [J]. *Journal of Medical Engineering & Technology* (S0309-1902), 1999, 23(6): 228-239.
- [45] 蔡彦, 许世雄, 景在平, 等. 腹主动脉瘤几何形态对血液动力学影响的三维数值分析[J]. *医用生物力学*, 2008, 23(2): 140-146.
- [46] K Perktold, T Kenner, D Hilbert, *et al.* Numerical Blood Flow Analysis: Arterial Bifurcation with a Saccular Aneurysm [J]. *Basic research in cardiology* (S0300-8428), 1988, 83(1): 24-31.
- [47] K Perktold, R Peter, M Resch. Pulsatile Non-newtonian Blood Flow Simulation through a Bifurcation with an Aneurysm [J]. *Biorheology* (S0006-355X), 1989, 26(6): 1011-1030.
- [48] 戴建华, 丁光宏, 龚剑秋等. 颅内动脉瘤的血液动力学二维数值模拟[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2004, 43(3): 392-396.
- [49] A C Burleson, C M Strother, V T Turitto. Computer Modeling of Intracranial Saccular and Lateral Aneurysms for the study of the Hemodynamics [J]. *Neurosurgery* (S0148-396X), 1995, 37(4): 774-784.
- [50] M Low, K Perktold, R Raunig. Hemodynamics in Rigid and Distensible Saccular Aneurysms: A Numerical Study of Pulsatile Flow Characteristics [J]. *Biorheology* (S0006-355X), 1993, 30(3-4): 287-298.
- [51] J R Cebal, M A Castro, S Appanaboyina, *et al.* Efficient Pipeline for Image-based Patient-specific Analysis of Cerebral Aneurysm Hemodynamics: Technique and Sensitivity [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging* (S0278-0062), 2005, 24(4): 457-467.
- [52] 温功碧, 李俊修, 陈伟. 颅内动脉旁瘤的血液动力学的三维数值模拟[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(5): 649-655.
- [53] M Aenis, A P Stancampiano, A K Wakhloo, *et al.* Modeling of Flow in a Straight Stented and non-stented Side Wall Aneurysm Model [J]. *Journal of biomechanical engineering* (S0148-0731), 1997, 119(2): 206-212.
- [54] Z Li, C Kleinstreuer. Blood Flow and Structure Interactions in a Stented Abdominal Aortic Aneurysm Model [J]. *Medical Engineering & Physics* (S1350-4533), 2005, 27(5): 369-382.
- [55] A Amblard, H W Berre, B Bou-Said, *et al.* Analysis of Type I Endoleaks in a Stented Abdominal Aortic Aneurysm [J]. *Medical Engineering & Physics* (S1350-4533), 2009, 31(1): 27-33.
- [56] 乔爱科, 刘有军, 张松. 支架治疗主动脉弓内侧动脉瘤的仿真研究[J]. *生医学工程学杂志*, 2007, 24(4): 852-856.
- [57] 张壮, 周虎, 汪源源, 等. 稳恒流下腹主动脉旁瘤超声多普勒血流信号的仿真分析[J]. *生物医学工程学进展*, 2008, 29(4): 187-190.
- [58] 张壮, 汪源源. 脉动流下动脉旁瘤超声多普勒血流信号仿真[J]. *声学技术*, 2009, 28(5): 167-168.
- [59] 周虎, 张壮, 汪源源, 等. 腹主动脉瘤超声多普勒血流信号仿真研究[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(8): 64-67.
- [60] 张壮. 动脉旁瘤内超声多普勒血流信号的计算机仿真研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.