

基于MRI和血流动力学仿真的主动脉缩窄计算机辅助诊断系统

史宇兵^{1,2}, Israel Valverde³, Patricia V. Lawford², D. Rodney Hose²

1. 陕西中医药大学整合医学研究院, 陕西 咸阳 712046; 2. Medical Physics Group, Department of Cardiovascular Science, Faculty of Medicine, Dentistry and Health, University of Sheffield, Sheffield, UK; 3. Division of Imaging Sciences and Biomedical Engineering, King's College London, The Rayne Institute, St. Thomas' Hospital, London, UK

【摘要】目前用于心脑血管系统疾病的计算机辅助诊断系统比较少,本研究基于参加欧盟FP7 euHeart项目所做的工作,以主动脉缩窄的处理为例,介绍一个基于核磁共振成像(MRI)和血流动力学计算的心脑血管疾病计算机辅助诊断系统,对系统的结构、功能和工作流程进行详细描述。该系统以患者病变血管的MRI图像和在颈动脉和股动脉处测得的血压波形为输入信息,通过图像处理模块、生理数据处理模块、计算网格生成模块以及流体动力学计算模块对这些数据进行分析处理,输出跨缩窄段的压差以辅助评估对患者进行干预手术的必要性,并输出病变血管段的流速分布、剪切应力分布等血流状态信息用于估算血流异常对血管内皮以及血细胞造成潜在机械损伤的程度。以一个典型病例的处理结果为例,对所开发的系统进行初步测试,结果表明所开发的系统运行结果准确可靠。本系统对于开发其他心脑血管疾病计算机辅助诊断系统具有借鉴意义。

【关键词】心脑血管疾病;计算机辅助诊断系统;核磁共振成像;血流动力学计算;计算机仿真

【中图分类号】R318;TP391.41

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)01-0126-07

Computer-aided diagnosis system for aortic coarctation based on MRI and hemodynamic simulation

SHI Yubing^{1,2}, Israel Valverde³, Patricia V. Lawford², D. Rodney Hose²

1. Institute of Integrative Medicine, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China; 2. Medical Physics Group, Department of Cardiovascular Science, Faculty of Medicine, Dentistry and Health, University of Sheffield, Sheffield, UK; 3. Division of Imaging Sciences and Biomedical Engineering, King's College London, The Rayne Institute, St. Thomas' Hospital, London, UK

Abstract: Currently there is few computer-aided diagnosis system for the cardiocerebral vascular diseases. Based on the research works conducted in the EU FP7 euHeart project and taking the diagnosis of aortic coarctation as an example, a computer-aided diagnosis system for the cardiocerebral vascular diseases based on MRI and hemodynamic calculation is presented, and the structure, function and the workflow of the system are explained in details. The system uses the MRI images of the diseased vessel and the pressure waveforms measured at carotid and femoral arteries as the input, analyzes these data using the image processing module, the physiological data processing module, the computational grid generation module and the hemodynamic calculation module, and outputs the pressure gradient across the coarctation to aid the assessment of necessity for interventional surgery, besides revealing the hemodynamic characteristics including the velocity and shear stress distributions to assist the prediction of potential for mechanical damages to the endothelium and blood cells accompanying the abnormal blood flow in the diseased vessel. The developed system is preliminarily validated using a typical case as the example, and the results show that the system give accurate and reliable predictions of the disease condition. The developed system can serve as a reference in building other computer-aided diagnosis systems for the cardiocerebral vascular diseases.

Keywords: cardiocerebral vascular disease; computer-aided diagnosis system; magnetic resonance imaging; hemodynamic calculation; computer simulation

【收稿日期】2022-07-11

【基金项目】欧盟第七框架规划(EU FP7/2007-2013)下 euHeart项目(224495);陕西省自然科学基金(2021JM-468)

【作者简介】史宇兵,教授,主要研究方向:心脑血管系统血流动力学、计算机仿真、心脑血管系统人工器官和医疗器械的设计优化, E-mail: yshi@sntcm.edu.cn

前言

计算机技术的发展带来了医学实践的巨大变化,而计算机辅助诊断系统的开发和临床应用是其中一个尤为活跃的领域。早期的计算机辅助诊断系统侧重于总结医学专家的知识 and 临床经验以构建出依据一系列特定诊断规则进行推理判断的计算机应用程序,用来诊治各种特定疾病。这方面的典型代表是各种基于著名老中医经验所开发的中医专家系统^[1]。近年来计算机辅助诊断系统更多地转向针对各类临床医学影像进行图像处理 and 特征识别与分类,以取得比人工识别疾病状态更高效、更准确、更客观的判断^[2]。目前这类计算机辅助诊断系统已经被广泛应用于各种肺部^[3-5]、乳腺^[6-13]、肿瘤^[6,10-11,14]、消化道^[2]、前列腺^[2]、颅骨^[15-16]、甲状腺^[14,17-19]疾病的临床诊断,但是针对常见心脑血管疾病的系统却比较少。公开报道中仅有少数基于影像测量脑出血血肿体积^[20]和脑出血量^[21]的计算机辅助诊断案例。不同于普通疾病诊断中主要依赖于对图像的处理和病变部位的形状、大小、图像纹理等指标的解读就可做出诊断的结论,在心脑血管疾病的诊断中,对临床影像进行图像处理后,主要的诊断依据则是反映血流状态和变化的血流流速、血压差、剪切应力等生理指标的定量化评估。这些评估在要求不高的情况下可以用简单的经验公式进行粗略估算^[22-25],而在血管形状复杂和对评估精度有一定要求时,就要涉及到复杂的流体力学计算,因此对于开发和使用过程都提出了

更高的要求^[23,26-28]。这可能是当前针对心脑血管疾病的计算机辅助诊断系统较少见的主要原因。

为了填补这样的技术空白,在欧盟 FP7 euHeart 项目 (<http://www.euheart.eu/>)中开发了基于核磁共振成像(MRI)和血流动力学仿真的主动脉疾病计算机辅助诊断系统软件。作为典型应用示范,该软件选取了主动脉缩窄和主动脉夹层两种疾病状态分别构建了结构和功能相似但是用途不同的两个版本。本文以其中面向主动脉缩窄的软件版本为例介绍该系统的结构、功能和工作流程,以期对心脑血管疾病的计算机辅助诊断系统的发展有所启发。

1 系统结构及处理流程

1.1 系统结构

本工作以 GIMIAS (Graphical Interface for Medical Image Analysis and Simulation, <http://www.gimias.org/>)为程序框架,在其上添加了本研究所涉及的功能模块(包括图像处理模块、生理数据处理模块、计算网格生成模块以及流体动力学计算模块),构成一个定制版的 GIMIAS 程序实现所开发的主动脉疾病计算机辅助诊断系统。实际应用中,将患者病变主动脉的 MRI 图像和在颈动脉和股动脉处测量得到的血压波形数据输入到该定制 GIMIAS 程序中,完成计算机辅助诊断任务。图 1a 所示为 GIMIAS 主动脉疾病计算机辅助诊断系统运行中的截屏,图 1b 是该系统的结构和功能简图。

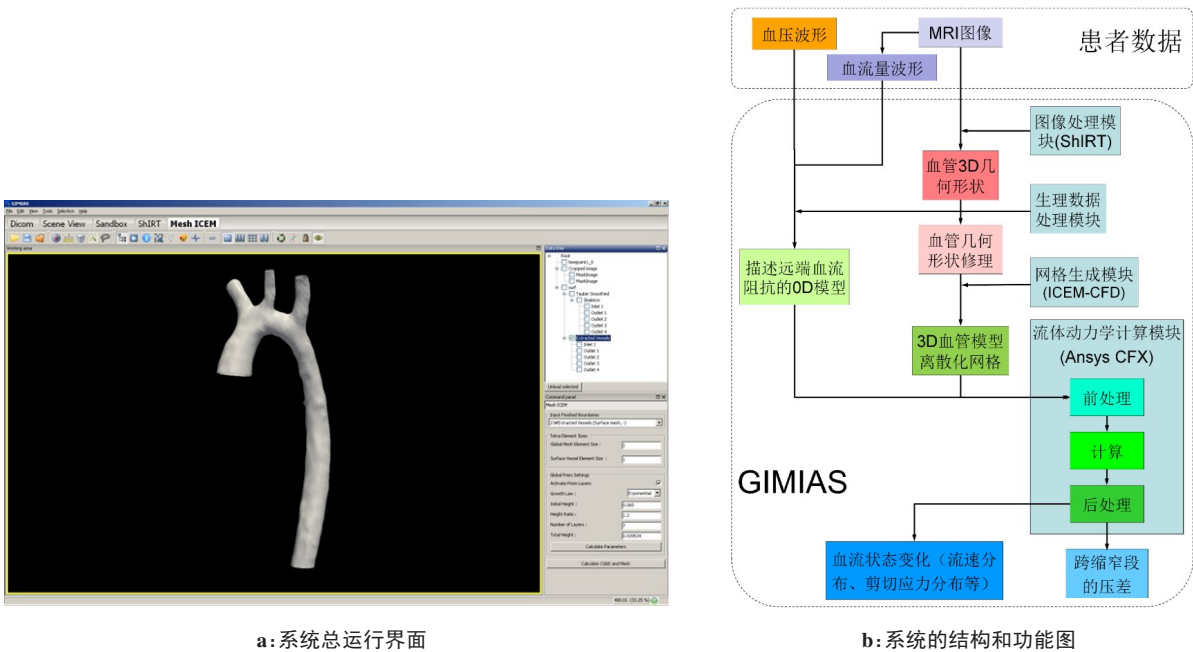


图 1 GIMIAS 主动脉疾病计算机辅助诊断系统
Figure 1 GIMIAS computer-aided diagnosis system for aortic diseases

不同维度的模型适用于不同的研究目的,因此本研究构建了一个0D/3D多维耦合模型描述所研究的血管段里的血流动力学状态和变化。其中,3D模型用于精确计算复杂血管形状对血管内血流动力学的详细影响,0D模型用来表征各血管分枝远端的血流阻抗特性对所研究的血管段内流动状态的影响。所构建的多维耦合模型如图2所示。

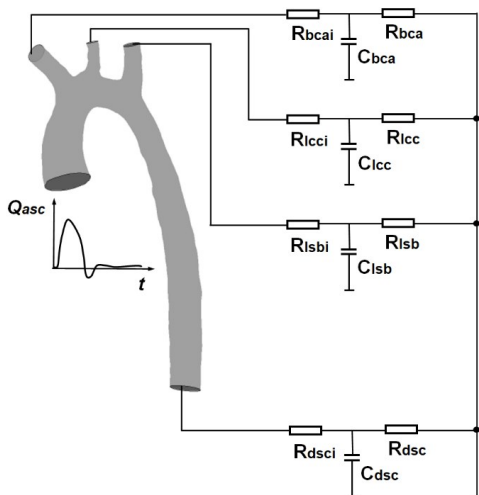


图2 血管段0D/3D多维耦合模型图

Figure 2 0D/3D coupled model for the vessel segment

图中 Q 表示流量, t 为时间, R 表示血流的摩擦阻尼, C 表示血管的弹性。下标asc指升主动脉,bca指头臂动脉,lcc指左颈总动脉,lsb指左锁骨下动脉,dsc指主动脉降支的横隔膜区域。各血管分枝中下标*i*表示该阻尼为三单元风腔模型的入口阻尼

1.2 系统处理流程

基于上述的系统结构,具体的工作流程如下展开。

1.2.1 通过MRI扫描构建血管的3D几何形状 作为开展计算机辅助诊断的数据输入,对特定患者的主动脉进行MRI扫描,以产生断层扫描图像序列。然后将图像序列以及断层间距值输入到GIMIAS程序的图像处理模块中,生成患者的主动脉3D几何形状。本研究组自行开发了用于该目的的图像处理程序ShIRT(Sheffield Image Registration Toolkit)。该过程也可以采用MRI系统自带的图像处理程序,或者使用通用的商业处理软件如Mimic(Materialise, Belgium)完成。

将3D构建得到的主动脉几何形状进行处理,保留升主动脉经主动脉弓到腹主动脉的主体段,以及主动脉弓处几个主要的血管分枝包括头臂动脉(The Brachiocephalic Artery, BCA)、左颈总动脉(The Left Common Carotid Artery, LCC)和左锁骨下动脉(The Left Subclavian Artery, LSB),切割去除对分析结果影

响不大的血管分枝远端。在GIMIAS中测量得到各血管分枝的直径,留待后续处理使用。将处理后的血管3D模型输入到网格生成模块中,生成描述患者主动脉形状的四面体网格。这里的计算网格生成模块采用ICEM-CFD软件(ANSYS Inc, Canonsburg, USA)。

1.2.2 处理临床数据以导出计算的边界条件 MRI系统的测量数据同时提供了升主动脉断层和腹主动脉断层处的血流量在全心脏周期内随时间变化的曲线。其中升主动脉处的血流量变化可以作为血流动力学计算中血管上游的入口边界条件。作为开展计算机辅助诊断的数据输入,另外在颈动脉和股动脉处采用应变片式压力传感器测量得到一定时长内该处血压随时间变化的曲线。颈动脉处测得的血压曲线可以作为主动脉弓各主要血管分枝BCA、LCC、LSB处血压的近似,而股动脉处测得的血压曲线可以作为腹主动脉处血压的近似。由于血流量和血压信号是采用两种不同的测量技术分别测得的,两者之间经常存在未知延时。为了消除3D血管模型入口出口各处血流量和血压信号之间的未知延时对计算精度的影响,本研究开发了患者临床数据处理功能模块,对这些实测的血流量和血压数据进行自动处理,由此导出各出口处的远端血流阻抗作为出口的边界条件。综合考虑计算的精度和效率需求,研究采用三单元风腔(Windkessel)模型描述血管各出口处的远端血流阻抗^[29]。该模块先基于各心脏周期内的最大最小值,将颈动脉和股动脉处测得的血压曲线划分为多个波形周期,从波形特征如峰值、谷值、上升时间等指标进行多角度比较,剔除偏差较大的波形周期,然后采用平均化和归一化处理得到代表性的颈动脉和股动脉血压波形周期^[30]。升主动脉断层和腹主动脉断层处的血流量之差是主动脉弓处各血管分枝的总血流量。按照Murray定律^[31-32],根据前面测量得到的血管分枝BCA、LCC、LSB的直径,将血管分枝的总血流量分配给BCA、LCC、LSB。基于BCA、LCC、LSB各自的血流量以及各分枝内血压数据(由颈动脉血压近似得到),可以推算出这些血管分枝各自的远端血流阻抗参数。同样,根据腹主动脉断层的血流量数据和腹主动脉内血压数据(由股动脉血压近似得到),推算得到腹主动脉远端血管的血流阻抗参数。

1.2.3 仿真参数的设定及计算过程和结果处理 血流动力学仿真分析模块使用ANSYS-CFX软件(ANSYS Inc, Canonsburg, USA),求解由描述主动脉及其分枝内血流特征变化的3D计算流体动力学模型和表征各分枝血管出口远端血流阻抗的0D集中参数

模型构成的多维耦合模型。对0D模型采用后向欧拉求解法以Fortran语言编程实现,通过定制的子例程的形式由负责3D计算的ANSYS-CFX软件在每个时间步长进行调用,实现0D模型和3D模型之间的完全双向耦合。对0D模型预先进行编译,所生成的动态链接库文件及描述各血管分枝中远端血流阻抗参数的数据文件保存在该患者的算例文件目录中,供3D计算程序调用。

3D流体动力学计算的参数设定在ANSYS-CFX软件的CFX-Pre模块中进行,可以通过交互式操作或运行预定制的脚本文件实现。图3所示为参数设定中一些步骤的截屏。参数设定的内容包括导入前述生成的计算网格文件、指定仿真的物理时长和计算的时间步长、定义流体的物理特性(粘性、密度等)、指定仿真采用的数值计算方法和收敛准则、设定具体

的边界条件及0D/3D耦合实现细节、流场初始化、指定对计算结果输出数据的要求等。参数设定的结果经保存后,导入ANSYS-CFX软件的CFX-Run模块进行计算。为了缩短计算时间,可以指定CFX-Run模块在多个CPU上并行执行,CFX-Run模块会自动对计算区域进行剖分并协调各区域在计算过程中的数据通讯。计算完成后,结果文件导入到ANSYS-CFX软件的CFX-Post模块中进行后处理,一方面由此计算出跨缩窄段的压差以评估对该患者进行干预手术的必要性,另一方面可以分析患部血管病变引起的血流状态(如流速分布、剪切应力分布等)异常及其对周围血管的内皮以及血细胞造成潜在机械损伤的程度。为了临床使用方便,后处理所需的全部操作也已经预定制为一个脚本文件,使用者只需运行该脚本文件就可自动完成这些结果处理任务。

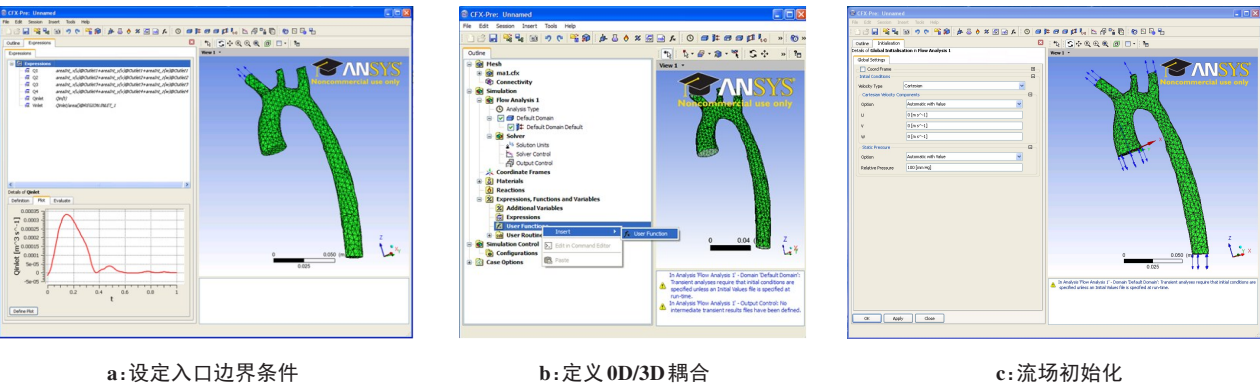


图3 在CFX-Pre模块中设定血流动力学计算的参数

Figure 3 Setting the parameters for the hemodynamic calculation in the CFX-Pre module

为了方便显示,图中的血管模型特意采用了极简单的表面网格。实际计算中网格的密度比图示要高得多,一般网格数都在100万以上,并且在近壁区域添加了几层三棱柱单元,以便在计算中充分分辨边界层中的力学变化从而保证计算精度

2 系统初步运行评测结果举例

为了评测该系统的性能,本项目先采集14例主动脉缩窄患者的病变血管MRI图像,同时采用X射线引导的心导管术测量升主动脉部和腹主动脉部的血压,将这些数据输入所开发的系统进行初步评测。除了在个别情况下(如血管分枝的形状畸变较大、测量中患者心率变化明显)计算机辅助诊断系统给出的诊断结果相比于导管测量值出现较大的误差(详细情况将在其他专门介绍血流动力学模型的文章中另行描述),评测结果整体满意。图4和图5为该系统对其中一个任选患者的诊断数据。图4是系统模拟的心脏收缩末期血管段内壁剪切应力分布以及速度分布和流线。其中图4a的剪切应力分布可用于估计血流状态对血管内壁和血细胞造成潜在机械损伤的可能性,图4b的速度分布可以和MRI的测量结果

相比较验证。图5所示为计算机模拟的血管缩窄段上下游血压变化与导管实测的血压变化的比较。根据临床上所采用的缩窄段上下游的峰值压差判据,计算机模拟所得的结果为 $\Delta P=100-77=23\text{ mmHg}>20\text{ mmHg}$,由此判断该患者需要接受手术治疗。与此相对照,采用X射线引导的心导管术得到的实测结果为 $\Delta P=100-79=21\text{ mmHg}>20\text{ mmHg}$,据此也判定该患者需要接受手术治疗。同时,比较计算结果和实测结果可发现,二者的误差仅为 $23-21=2\text{ mmHg}$,所以计算结果准确地贴合了实测结果,该辅助诊断系统从精确度和可靠性方面都符合要求。下一步的研究是以非侵入式方法测量颈动脉和股动脉处的血压变化,以此作为升主动脉处和主动脉弓处各血管分枝内血压以及腹主动脉处血压的近似,并重复上述验证过程。

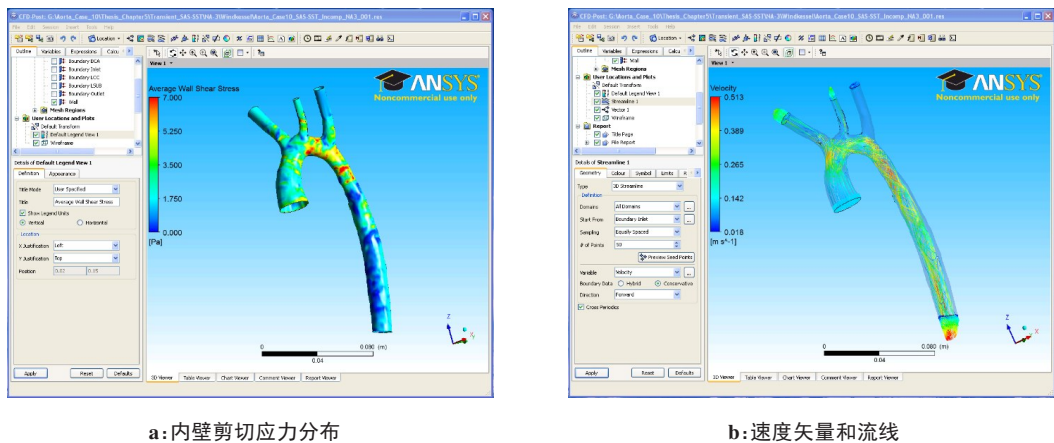


图4 在CFX-Post 模块中的后处理
Figure 4 Post-processing in the CFX-Post module

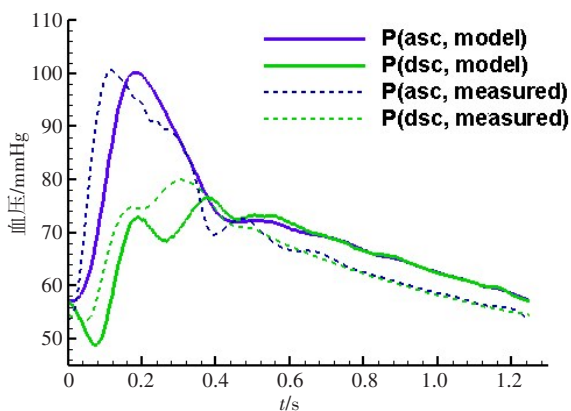


图5 狭窄段上下游血压变化的模拟值与实测值比较
Figure 5 Comparison between the predicted and the measured upstream and downstream pressures at the coarctation segment

asc 和 dsc 表示升主动脉处和降主动脉的横膈膜处。标注“model”的曲线是所开发的辅助诊断系统计算得出的模型预测值,标注“measurement”的曲线是采用X射线引导的心导管术得到的实测值。根据这些血压响应可以计算出跨狭窄段的压差,以评估主动脉狭窄的严重程度

3 讨论

本研究开发了一个基于MRI和血流动力学仿真的心脑血管疾病计算机辅助诊断系统,并以其主动脉缩窄版本为例介绍系统的结构、功能和工作流程。如前所述,不同于当前大多数对于其他疾病的计算机辅助诊断系统,心脑血管疾病的计算机辅助诊断系统除了常规的图像处理功能之外,还需要进行后续的血流动力学模拟分析,这是由心脑血管系统所承担的血流传输功能所决定的。这也体现了两种系统进行诊断时所关注的侧重点方面的显著差异,而血流动力学模拟分析功能更是直接决定心脑血管疾病计算机辅助诊断系统诊断精度的主要因素。现有的一些用于心脑血管疾病的计算机影像处理软件往往附带了简单的血流动力学估算功能。例如,各种

血流通道的狭窄是心脑血管疾病的常见症状,可发生于心脏瓣膜狭窄、冠心病、脑梗等许多情况下。评价这类通道狭窄的严重程度一般是基于跨狭窄部位的血压差。在很多血管影像处理软件中一般用类似 $\Delta P = 4(v_s^2 - v_u^2)$ 的经验性代数公式估算跨狭窄段的血压差^[22],有时甚至进一步简化为 $\Delta P = 4v_s^2$,这里 ΔP 表示血压差,单位为mmHg; v_s 为狭窄段喉部的血流速度, v_u 为狭窄段上游入口处的血流速度,其单位都为m/s。该代数公式从理论上讲是基于流体力学的Bernoulli对流效应^[33],同时忽略了实际情况下血流惯性及瞬态变化、血管不规则形状及曲率等因素,所以使用方便但是精度有限。文献[34-35]探讨了综合考虑入口效应、狭窄段的Bernoulli对流效应^[33]和Poiseuille摩擦损失效应^[33]更精确的代数公式。文献[30]扩展到应用简单的0D微分方程进一步描述血流惯性对压差计算的影响。这些模型大大提高了估算的精度,但是限于模型简便性的要求没有考虑血管不规则形状及曲率等因素。如果希望考虑这些实际存在的复杂因素所造成的流动剖面内的二次流以进一步提高估算精度,就需要采用3D计算流体力学作为研究工具,如文献[27-28, 36-37]所介绍的。当然,这样的高精度计算就会对所需的计算机硬件、所花费的计算时长以及操作者的技术知识提出更多的要求。设计计算机辅助诊断系统时需要对这些方面综合考虑,在经济性、精度、易用性各方面取得平衡。本研究中所开发的系统以精度作为首要目标,所以其中的血流动力学计算模块采用了0D/3D耦合模型来全面描述血管段的流动状态变化。后续扩展中考虑增加一个类似文献[30, 35]中所描述的部分描述血管形状因素的0D微分方程模型(比目前的影像处理软件中附带的经验性代数公式稍复杂但更精确,而计算速度仍然非常快),以满足临床上对快速性的

追求优先于精度的场合,例如各种心脑血管系统急诊中的应用。

本研究目前阶段侧重于从无到有构建出心脑血管疾病的计算机辅助诊断系统,其中采用商业软件ICEM-CFD和ANSYS CFX完成计算网格生成和流体动力学计算的任务。应用商业软件作为系统的功能部件加快开发过程,但是不利于形成具有完全独立知识产权的诊断系统,这对于系统的远期推广造成一定困难。为此研究组在下一阶段的工作中将使用开源计算流体力学软件OpenFoam、SU2等替代ANSYS CFX以完成流体力学计算,使用开源网格生成软件TetGen、Netgen等替换ICEM-CFD以生成计算所需网格,从而消除对商业软件的依赖,这将极大降低该系统的成本并推动其在临床实践中的广泛应用。

4 结论

本研究以对主动脉缩窄的处理为例,介绍了一个基于MRI和血流动力学计算的心脑血管疾病计算机辅助诊断系统的结构、功能和工作流程,并以对一个典型病例的处理结果为例,对所开发的系统进行初步测试,测试结果表明所开发的系统运行结果准确可靠。本系统对于开发其他的心脑血管疾病计算机辅助诊断系统具有借鉴意义。

【参考文献】

- [1] 江启煜,孙晓生. 计量诊断与计算机诊疗系统的研究进展[J]. 陕西中医学院学报, 2010, 33(3): 89-91.
Jiang QY, Sun XS. Study advances of quantitative diagnosis and computer diagnosis & treatment system [J]. Journal of Shaanxi College of Traditional Chinese Medicine, 2010, 33(3): 89-91.
- [2] 郑光远,刘峡壁,韩光辉. 医学影像计算机辅助检测与诊断系统综述[J]. 软件学报, 2018, 29(5): 1471-1514.
Zheng GY, Liu XB, Han GH. Survey on medical image computer aided detection and diagnosis systems[J]. Journal of Software, 2018, 29(5): 1471-1514.
- [3] 吴育鑫,薛蕴菁,段青,等. 基于深度学习的计算机辅助诊断系统检出DR胸部正位片中的骨折[J]. 中国介入影像与治疗学, 2020, 17(11): 675-678.
Wu YX, Xue YJ, Duan Q, et al. Deep-learning based computer aided diagnosis system in detecting fractures on anteroposterior chest DR films[J]. Chinese Journal of Interventional Imaging and Therapy, 2020, 17(11): 675-678.
- [4] 王洪洋,张颖,朱海波,等. 基于肺部CT图像的计算机辅助诊断系统构建[J]. 中国医学装备, 2018, 15(10): 98-102.
Wang HY, Zhang Y, Zhu HB, et al. Construction of computer-aided diagnosis system based on CT image of lung [J]. China Medical Equipment, 2018, 15(10): 98-102.
- [5] 聂永康,赵绍宏,王瑞民,等. 应用计算机人工神经网络系统结合CT与PET鉴别良、恶性肺结节[J]. 中国医学影像技术, 2011, 27(4): 836-839.
Nie YK, Zhao SH, Wang RM, et al. Computerized distinction of benign and malignant pulmonary nodules on PET and CT with an artificial neural network [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2011, 27(4): 836-839.
- [6] 吴秀明,王霞丽,吕国荣,等. 计算机辅助系统在诊断乳腺良恶性肿瘤中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(3): 374-378.
Wu XM, Wang XL, Lü GR, et al. Application of computer-aided detection in ultrasound diagnosis of benign and malignant breast tumors [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(3): 374-378.
- [7] 吕明慧,周帅,朱强. 基于深度学习乳腺超声计算机辅助诊断系统研究进展[J]. 中国医学影像技术, 2020, 36(11): 1722-1725.
Lü MH, Zhou S, Zhu Q. Research progresses of breast ultrasound computer aided diagnosis systems based on deep learning [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2020, 36(11): 1722-1725.
- [8] 包昌宇,彭俊川,胡楚婷,等. 基于深度学习的乳腺钼靶图像分类方法研究进展[J]. 生物医学工程研究, 2020, 39(2): 208-213.
Bao CY, Peng JC, Hu CT, et al. Research progress on classification methods for mammogram based on deep learning [J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2020, 39(2): 208-213.
- [9] 蔡雅丽,蔡盛,施敏敏,等. 计算机辅助系统在乳腺钙化性病变X线摄影诊断中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2019, 27(12): 910-913.
Cai YL, Cai S, Shi MM, et al. Application of computer-aided system in X-ray diagnosis of breast calcification lesions [J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology, 2019, 27(12): 910-913.
- [10] 周靖宇,成官迅. 基于MRI的乳腺癌计算机辅助检测与诊断系统的应用和进展[J]. 功能与分子医学影像学(电子版), 2017, 6(4): 1349-1353.
Zhou JY, Cheng GX. Application and progress of MRI-based computer-aided diagnosis system for breast cancer [J]. Functional and Molecular Medical Imaging (Electronic Edition), 2017, 6(4): 1349-1353.
- [11] 宋颖,欧阳汉,叶枫,等. MRI计算机辅助诊断系统对不同经验医师鉴别乳腺小肿块良恶性的价值[J]. 放射学实践, 2016, 31(7): 638-643.
Song Y, Ouyang H, Ye F, et al. Value Of MRI-CAD in the differentiation between small benign and malignant breast masses for readers with different level of experience [J]. Radiologic Practice, 2016, 31(7): 638-643.
- [12] 宋颖,欧阳汉,叶枫,等. 应用MRI计算机辅助诊断系统(CAD)评估乳腺小肿块血流动力学特征的价值[J]. 放射学实践, 2015, 30(5): 560-565.
Song Y, Ouyang H, Ye F, et al. Value of hemodynamic characteristics for small breast masses evaluated by MRI computer-aided diagnosis system [J]. Radiologic Practice, 2015, 30(5): 560-565.
- [13] 司丽芳,刘小娟,杨开颜,等. 计算机辅助检测系统在乳腺单纯性钙化病灶中的应用价值及其对诊断医师的影响[J]. 放射学实践, 2014, 29(8): 942-944.
Si LF, Liu XJ, Yang KY, et al. Impact of computer-aided detection on the performance of mammogram reader in interpreting breast lesions presenting as pure calcification [J]. Radiologic Practice, 2014, 29(8): 942-944.
- [14] 巴黎,刘千琪,田洁,等. 计算机辅助检测和诊断系统鉴别甲状腺良恶性结节的价值研究[J]. 中国超声医学杂志, 2018, 34(2): 108-111.
Ba L, Liu QQ, Tian J, et al. Study on the diagnostic value of computer-aided detection and diagnosis system in differentiating benign and malignant thyroid nodule [J]. Chinese Journal of Ultrasound in Medicine, 2018, 34(2): 108-111.
- [15] 张金增. 多层螺旋CT后重建技术在颅脑损伤中的应用价值[J]. 实用心脑血管病杂志, 2014, 22(7): 134.
Zhang JZ. Application value of multi-slice spiral CT post-measurement reconstruction technique in craniocerebral injury [J]. Journal of Practical Cardiocerebral Pulmonary Vasculopathy, 2014, 22(7): 134.
- [16] 陈飞军,张小军,李平根. 计算机辅助的颅骨成形治疗颅骨缺损的优越性研究[J]. 实用心脑血管病杂志, 2010, 18(4): 432-433.
Chen FJ, Zhang XJ, Li PG. The superiority of computer assisted cranioplasty for cranial defect [J]. Journal of Practical Cardiocerebral Pulmonary Vasculopathy, 2010, 18(4): 432-433.
- [17] 李婷婷,卢漫,巫明钢,等. 计算机辅助诊断系统对甲状腺结节的诊断价值研究[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2019, 16(9): 660-664.
Li TT, Lu M, Wu MG, et al. Performance of computer-aided diagnosis system versus radiologists in diagnosis of thyroid nodules [J]. Chinese Journal of Medical Ultrasound (Electronic Edition), 2019, 16(9): 660-664.
- [18] 孙逸芳,董磊. 计算机辅助系统联合超声对甲状腺结节的鉴别诊断价值[J]. 实用医药杂志, 2019, 36(1): 24-26.
Sun YF, Dong L. The differentiation value of computer-aided diagnosis system in ultrasound diagnosis of thyroid nodule [J]. Practical Journal of Medicine & Pharmacy, 2019, 36(1): 24-26.
- [19] 于立超,吴长君. 结合甲状腺影像报告及数据系统的甲状腺超声CAD的研究进展[J]. 临床与病理杂志, 2018, 38(3): 628-633.

- Yu LC, Wu CJ. Research progress of thyroid ultrasound CAD combined with thyroid imaging report and data system[J]. *Journal of Clinical and Pathological Research*, 2018, 38(3): 628-633.
- [20] 贾永军, 于楠, 于勇, 等. 基于深度学习的计算机辅助诊断系统对脑出血血肿体积的测量研究[J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2021, 19(2): 180-183.
- Jia YJ, Yu N, Yu Y, et al. Accuracy of deep learning-based computer aided diagnosis system for measuring the intracranial hematoma volume[J]. *Chinese Imaging Journal of Integrated Traditional and Western Medicine*, 2021, 19(2): 180-183.
- [21] 赖建东, 王宁, 罗坤, 等. 基于深度学习计算机辅助诊断系统测量脑出血量[J]. *中国医学影像技术*, 2020, 36(12): 1781-1785.
- Lai JD, Wang N, Luo K, et al. Measuring volume of cerebral hemorrhage based on deep learning computer aided diagnostic system[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2020, 36(12): 1781-1785.
- [22] Wymer DT, Patel KP, Burke WF, et al. Phase-contrast MRI: physics, techniques, and clinical applications[J]. *Radiographics*, 2020, 40(1): 122-140.
- [23] Garcia J, Barker AJ, Markl M. The role of imaging of flow patterns by 4D flow MRI in aortic stenosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(2): 252-266.
- [24] Zhang M, Liu J, Zhang H, et al. CTA-based non-invasive estimation of pressure gradients across a CoA: a validation against cardiac catheterisation[J]. *J Cardiovasc Transl Res*, 2021, 14(5): 873-882.
- [25] Nita CI, Puiu A, Bunesco D, et al. Personalized pre-and post-operative hemodynamic assessment of aortic coarctation from 3D rotational angiography[J]. *Cardiovasc Eng Technol*, 2022, 13(1): 14-40.
- [26] Wahlin A, Eklund A, Malm J. 4D flow MRI hemodynamic biomarkers for cerebrovascular diseases[J]. *J Intern Med*, 2022, 291(2): 115-127.
- [27] Schollenberger J, Osborne NH, Hernandez-Garcia L, et al. A combined computational fluid dynamics and arterial spin labeling MRI modeling strategy to quantify patient-specific cerebral hemodynamics in cerebrovascular occlusive disease[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9: 722445.
- [28] Brown AG, Shi Y, Marzo A, et al. Accuracy vs. computational time: translating aortic simulations to the clinic[J]. *J Biomech*, 2012, 45(3): 516-523.
- [29] Shi Y, Lawford P, Hose R. Review of zero-D and 1-D models of blood flow in the cardiovascular system[J]. *Biomed Eng Online*, 2011, 10: 33.
- [30] Shi Y, Valverde I, Lawford PV, et al. Patient-specific non-invasive estimation of pressure gradient across aortic coarctation using magnetic resonance imaging[J]. *J Cardiol*, 2019, 73(6): 544-552.
- [31] Murray CD. The physiological principle of minimum work: I. the vascular system and the cost of blood volume[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 1926, 12(3): 207-214.
- [32] Revellin R, Rousset F, Baud D, et al. Extension of Murray's law using a non-Newtonian model of blood flow[J]. *Theor Biol Med Model*, 2009, 6(7): 7.
- [33] White F. *Fluid mechanics* [M]. New York: McGraw Hill, 2015: 163-264.
- [34] May AG, De Weese JA, Rob CG. Hemodynamic effects of arterial stenosis[J]. *Surgery*, 1963, 53(4): 513-524.
- [35] Shi Y, Valverde I, Lawford PV, et al. Comparison of stenosis models for usage in the estimation of pressure gradient across aortic coarctation[J]. *J Biol Phys*, 2021, 47(2): 171-190.
- [36] Skopalik S, Barrientos PH, Matthews J, et al. Image-based computational fluid dynamics for estimating pressure drop and fractional flow reserve across iliac artery stenosis: a comparison with *in-vivo* measurements[J]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2021, 37(12): e3427.
- [37] Marlevi D, Schollenberger J, Aristova M, et al. Noninvasive quantification of cerebrovascular pressure changes using 4D Flow MRI[J]. *Magn Reson Med*, 2021, 86(6): 3096-3110.

(编辑:陈丽霞)