DOI:10.16156/j.1004-7220.2009.06.005

文章编号：1004-7220(2009)03-0395-06

·专家论坛·

基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划进展

刘有军， 乔爱科
(北京工业大学 生物医学工程中心，北京 100124)

摘要：基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划是面向医学应用的血流动力学数值模拟的高级发展阶段，它基于医学图像对个性化手术的血流动力学预期进行优化，可为临床心血管手术提供决策依据。综述了基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划的国内外研究现状，分析了目前其中存在的关键问题和解决途径，并提出了今后进一步研究工作的目标。

关键词：血流动力学；数值模拟；手术规划；心血管
中图分类号：R318.01 文献标志码：A

Progress of based on hemodynamics simulation cardiovascular surgical planning

LIU You-jun, QIAO Ai-ke (Biomedical Engineering Center, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Hemodynamics-simulation-based cardiovascular surgical planning, which is the patient-specific surgical hemodynamics optimization based on medical image, is the further development of clinical-application-oriented computational hemodynamics, it is very helpful for cardiovascular surgical decision-making. The art-in-work of hemodynamics-simulation-based cardiovascular surgical planning in both domestic and overseas research was reviewed, the key problems and solutions involved were analyzed, and the further developing objectives were presented.

Key words: Hemodynamics; Numerical simulation; Surgical planning; Cardiovascular

心血管疾病是危害人类健康的严重疾病，其死亡率居各类死亡原因之首。所以，心血管疾病的预防、诊断和治疗是一项迫切需要解决的重大课题。自从引入现代医学成像技术、外科手术和药理学治疗方案后，心血管疾病的诊断和治疗技术有了很大的进步，同时心血管疾病的治疗方法也有了较大的选择余地，如手术搭桥、介入治疗、药物及基因治疗等。心血管疾病治疗方法选择范围的扩大，导致了治疗方案决策过程的复杂化。

血液在血管内流动的血流动力学因素，对心血管疾病手术、介入治疗的效果和长期有效性有很大的影响。一方面，血管特别是动脉血管内的血流动力学因素与血管内膜加厚、内皮细胞损伤、内膜平滑肌细胞增生、粥样硬化斑块形成等血管疾病密切相关。另一方面，血管内的血流动力学对血管的几何形状强烈敏感，即血管几何形状的微小差异也会导致血流动力学的明显差异。所以，血流动力学不仅在动脉粥样硬化的发生和发展过程中起着决定性的作用，而且使外科医生在心血管疾病的手术、介入治疗等过程中，也必须充分考虑血流动力学的因

收稿日期：2009-02-06

作者简介：刘有军，男，博士，研究员。研究方向为基于医学图像的建模仿真及基于生物力学仿真的手术规划，特别是血流动力学数值模拟及其医学应用。在 International journal of hyperthermia, Acta mechanics, Journal of biological physics, 力学学报等国内外期刊上发表论文50余篇，其中14篇被SCI收录，25篇被EI收录，出版教材一部。E-mail: lyjma@bjut.edu.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

素[1]。

目前,心血管外科手术的决策过程还主要依靠医生的临床经验,根据以往相似病情病人的治疗情况来评估治疗方案对当前病人的治疗效果,而缺乏对当前特定病人的手术规划和疗效预测。基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划,其主要目的是建立个性化的手术模型,通过对不同手术方案的血流动力学进行数值计算和比较,达到优化心血管外科手术的血流动力学状况的目的,保证手术的长期有效性。

1 国内外研究现状

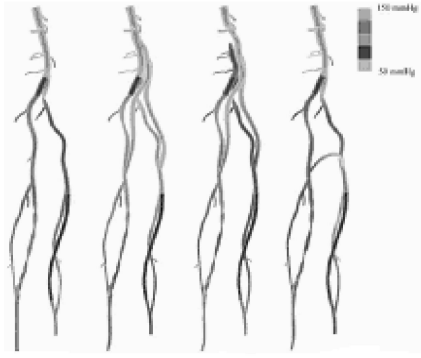
由于血流动力学因素与心血管疾病治疗的长期有效性密切相关,所以有必要在治疗方案的决策过程中引入计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法来对治疗方案可能产生的血流动力学因素进行预测。长期以来,受血流动力学与动脉粥样硬化密切相关这一事实的驱动,人们采用 CFD的方法对血流动力学进行了大量研究。概括起来,可以将血流动力学的数值模拟分为三个发展阶段:

第一阶段是基于 CAD理想化模型的血流动力学数值模拟。主要用于从统计平均的角度研究血流动力学因素(如壁面切应力)与血管疾病特别是动脉粥样硬化之间的关系。研究的重点是动脉粥样硬化病灶性部位如主动脉弓、颈动脉分支、腹主动脉、冠状动脉等。

第二阶段是基于医学图像的个性化(Patient-specific)血流动力学数值模拟。主要用于预测特定个体血流动力学因素与动脉病变发生、发展的关系。研究的重点是动脉瘤、血管支架等。著名的学者包括 Lohner, Cebral, Steinman等[2-11],以及海外华人学者 Liu[12-13]、Xu[14]等。

第三阶段是完全面向医学临床应用的血流动力学数值模拟,即基于血流动力学数值模拟的血管外科手术规划。作为心血管疾病治疗方案的辅助决策或手术规划,要求血流动力学的 CFD仿真模型必须是解剖和生理真实的,这就是“血液流动虚拟现实”。它是基于血流动力学数值模拟血管手术规划的最新发展方向。Stanford大学的 Taylor等最早建成了世界上第一个虚拟血管系统实验室(Virtual Vascular Laboratory)[15-18],如图 1所示。该“实验室”不是物理实验室,而是一个数值计算平台,即由计算机系统、数字图像处理系统及数值计算软件组成的血流动力学仿真系统。他们在下肢动脉人工血管转流术的手术规划、疗效预测与评价等方面取得了一系列重大研究成果,并形成了一个全新的研究领域——预测医学或外科手术(predictive medicine or surgery)。医生可以考虑病人的解剖结构和生理条件的个体差异,基于医学图像建立解剖和生理真实的手术模型,利用血流动力学数值计算来评价和比较各种不同的治疗方案,通过获得最佳的血流动力学参数来保证手术的成功和长期有效性。类似的研究计划还包括 Biosim[19], Bloodsim[20]等。

(a)



(b)

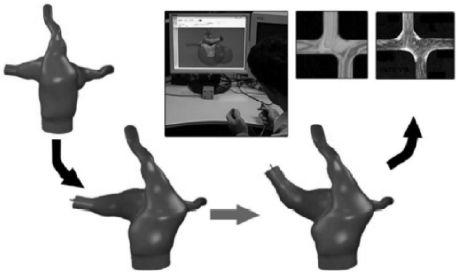
图 1 下肢动脉搭桥术血流动力学手术规划[16] (a)基于医学图像的建模;(b)不同术式血流动力学比较

Fig. 1 Hemodynamics-based surgical planning of lower extremity arterial bypass[16] (a) Medical image-based modeling; (b) Hemodynamic comparison of different surgical operations

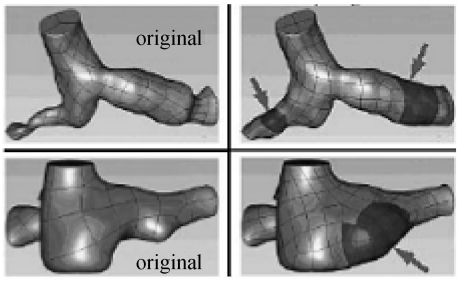
近期有代表性的是 SURGEM[21]心血管外科手术规划系统的问世。SURGEM是由 Georgia Tech和 Emory University联合开发的。该系统是一个基于医学图像的外科手术规划软件,外科医生可以基于

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

医学图像重建病人个性化的三维心脏及血管的几何模型, 利用虚拟现实技术在此几何模型上方便地构造想象中的手术模型 (图 2), 然后利用软件的 CFD 功能对既定的手术模型进行血流动力学数值模拟, 分析不同术式或手术参数对术后血流动力学的影响, 从而达到从血流动力学的角度来优化手术的目的。该系统已成功应用于儿童先天性心脏病的手术规划[22]。



(a)



(b)

图 2 手术规划几何模型再塑[21] (a)改良式 Fontan氏房-肺动脉分流术模型; (b)狭窄血管加宽补片术模型

Fig. 2 Anatomical geometry sculpture for surgical planning[21] (a) Intra-atrial model of the inferior vena cava for Fontan Operation; (b) Surgical patch for vascular stenosis

目前, 我国血流动力学的研究还基本上处于零星研究的状态。数值计算的血管几何模型大多是理想化的, 而基于医学图像的个性化血流动力学仿真并不多见, 也没有形成有效、方便的集成系统, 包括基于医学图像处理的心血管系统建模、高效的数值计算软件、完善的流动可视化处理等。这些研究离手术规划和实际临床需要还有很大差距。有关研究学者包括: 蒋文涛、邓小燕、樊瑜波、袁支润、岑人经、吴效明、乔爱科等[23-28]。

邓小燕等[29]对动脉旋动流及其临床应用进行了深入研究。人体循环系统内的旋动流是一种正常的生理流动现象。该旋动流有利于保护动脉血管内壁面免受侧向应力的直接作用, 有利于动脉血管内皮损伤的修复。该研究将动脉系统中的旋动流原理应用到小口径人造血管的设计中, 研究了旋动流对小口径人造血管的血流动力学特性的影响。结果表明: 旋流引导器的植入可使小口径人造血管内的血流产生旋动, 血管近壁面处的血流速度及壁面切应力均得到了显著提高, 血流动力学环境得到了明显的改善。

乔爱科、刘有军等[30-32]对主动脉弓、颈动脉分支、动脉瘤及动脉搭桥术的血流动力学进行了深入研究, 并将这些研究成果用于指导心血管外科手术。为了改善传统单路搭桥移植管缝合区的血流动力学性能以提高搭桥术的治疗效果, 提出了对称双路移植管搭桥的设想以减小缝合区的流动分布不均匀性。利用计算流体力学的方法对其中的血液流动进行了数值模拟[33, 34]。计算结果显示, 在对称双路移植管模型中, 底面不复存在, 因此内膜增生和狭窄发生的潜在危险区域被取缔。双路模型中的流场情况比单路模型中更均匀。因此, 在流动情况方面, 双路模型比单路模型具有更多的优点。同时, 单路模型底面的壁面切应力很紊乱、壁面切应力梯度数值较大; 而双路模型已经克服了这些缺点, 双路模型中的壁面切应力时间梯度比单路模型的要小。所有这些现象都表明对称双路搭桥可以明显地改善血流动力学, 从而减少内膜增生和狭窄的发生, 并改善动脉搭桥的手术效果。

为了弄清楚旁路搭桥转流术治疗 DeBakeyIII型主动脉夹层的血流动力学机制及其血流动力学有效性问题, 我们前期建立了相应的理想化模型和个性化模型, 利用数值模拟的方法获得了搭桥前后的流场、压力和壁面切应力等血流动力学参数的分布情况[35, 36]。探讨该术式的科学手术方案, 将为医生提供有价值的手术计划指导。

2 关键问题

基于血流动力学数值模拟的血管外科手术规划, 目前还有许多亟待解决的关键问题:

(1) 作为手术规划的血流动力学数值模拟, 必须建立各种虚拟的手术规划模型, 以对不同类型的手术或术式进行比较与优化。典型的心血管手术过

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

程包括通过移植管来旁通狭窄或阻塞的动脉血管，或在血管中介入血管支架来扩大管腔、阻塞动脉瘤内血流等。这些手术过程都会改变血管的几何形态。这就要求基于医学图像重建的术前模型必须是可以“再塑”或“编辑”的（图 2）[37-40]，以获得各种手术方案所需要的血管几何形状。“几何模型再塑”是血流动力学数值模拟第三阶段最显著的特征。传统的方法是在基于医学图像重建的术前模型上采用 CAD的方法来改造模型。这种 CAD方法一方面对模型的变形难以处理，另一方面构造的模型过于“生硬”[38]，不能满足手术规划对模型真实性的要求。最新的研究成果[38]采用基于虚拟现实的模型雕塑技术，但其变形模型是纯数学的，未考虑血管力学性能对变形的影响。

（2）在精确几何模型的基础上，血流动力学数值模拟还要求物理模型尽可能与生理状况一致，这样才有可能获得具用临床应用价值的血流动力学参数。目前血流动力学数值模拟物理模型还未充分考虑的因素是血液与管壁之间的流 固耦合问题[41]。对于冠状动脉等心血管，传统的刚性血管假设会给血流动力学计算带来较大误差，无法满足临床手术规划对血流动力学精度的要求[2]。

（3）基于医学图像的血流动力学数值模型，其网格数量之大常常是惊人的。这就要求非常高的有限元求解效率，包括网格优化和方程求解[42-47]等过程，以适应临床手术允许的等待时间。

（4）血流动力学仿真结果的可视化也值得重视[18]，因为感兴趣的血流动力学参数并不是一般数值计算软件所能提供的，如壁面切应力、粒子滞留时间、壁面切应力的时间和空间梯度等。同时，现有的血液流动可视化是独立于人体之外的，与血管在人体中的具体位置难以对应，不能满足临床手术规划对可视化直观性的要求。

3 进一步工作

3.1 从医学图像到有限元网格

基于医学切片图像，采用数字图像处理的方法，包括图像增强、图像分割、表面绘制、表面网格简化与优化等，重建个性化解剖真实的三维血管几何模型，并针对血流动力学有限元数值模拟对网格的特殊要求（如边界层网格等），生成高效、精确的手术规划有限元模型（图 3）。重点研究图像分割、三维重建、网格划分算法及其实现。

3.2 手术规划几何模型再塑

在血管三维重建表面模型的基础上，根据不同手术类型和不同术式，对血管模型进行编辑再塑，包括模型的局部形变、添加附加模型等。主要研究考虑血管力学性能的血管雕塑变形数学模型，以及基于虚拟现实技术的实现方法（图 4）。

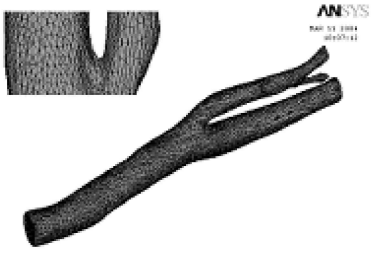


图 3 个性化颈动脉分支有限元模型

Fig. 3 Patient-specific finite element model of carotid bifurcation

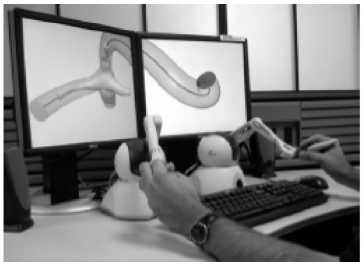


图 4 手术规划几何模型实时交互式雕塑[21]

Fig. 4 Real time interactive sculpture of anatomic geometry for surgery planning[21]

3.3 血流动力学的流 固耦合有限元分析

血液在动脉血管内的流动是一个流 固耦合的力学过程。传统的血管刚性化处理不能精确地反映血流动力学及其对手术效果的影响。采用流 固耦合的物理模型将更接近于血液流动的生理状况，这也是血流动力学研究的重要发展方向之一。重点研究可移动边界（血管壁）三维流体动力学、有限变形结构的耦合有限元分析方法及实现。

3.4 有限元并行计算

基于医学图像的个性化血管几何模型进行血流动力学数值模拟，因有限元网格数量巨大而非常耗时。考虑血液与血管壁的流 固耦合时，计算时间将会更长。除优化有限元网格外，还必须在求解过程

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中追求更高的效率。可以采用并行算的方法来提高求解速度,重点研究流体域和固体域独立计算的区域分解并行算法。

3.5 流动可视化

血流动力学的数值计算结果是海量的离散数据。为方便医生应用,必须应用现代流动可视化技术,将临床关心的血流动力学参数计算结果形象地表现出来,如速度矢量、压力、壁面切应力及其时空梯度的等值线云图等,以实现手术规划需要的"虚拟可视化"(图 5)。

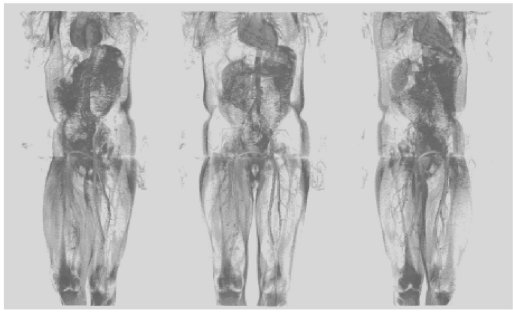


图 5 下肢动脉移植管转流手术规划流动可视化[18]

Fig. 5 Flow visualization of lower extremity arterial graft bypass surgery[18]

3.6 手术规划应用软件开发

开发一个解剖真实的血管模型、手术规划模型雕塑、血流动力学数值计算及流动可视化的软件集成环境。在该环境中,可以利用血管的 CT或 MRI 图像来三维重建个性化的血管几何模型,通过基于虚拟现实技术的血管雕塑来构造虚拟手术模型,结合生理真实的边界条件,在友好的图形界面引导下自动完成血流动力学的数值计算和流动可视化处理,供医生在手术方案决策中使用。

4 结论

基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划,可以为心血管外科手术提供最优化的血流动力学状况,从而提高手术的成功率和长期有效性。同时,可以最大限度地缩短手术时间,降低重复手术率和死亡率,提高心血管病人的生存质量。所以,基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划将对心血管外科手术过程产生革命性的影响,其中关键的科学和技术问题还值得研究,临床上也迫切需要实用的手术规划软件。

参考文献:

[1] Ghassan S, Kassab, Jose A, Navia. Biomechanical considerations in the design of graft: the homeostasis hypothesis[J]. Annual Review of Biomedical Engineering, 2006, 8: 499-535.

[2] Rainald L, Juan C, Orlando S, et al. Applications of patient-specific CFD in medicine and life sciences[J]. International journal for numerical methods in fluids, 2003, 43: 637-650.

[3] Cebral J R, Marcelo A C, Rainald L, et al. Recent development in patient-specific image-based modeling of hemodynamics[C]// Mecanica Computacional Vol. XXIII. Bariloche, Argentina, 2004.

[4] Cebral J R, Löhner R. From medical images to anatomically accurate finite element grids[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 51: 985-1008.

[5] Cebral J R, Lohner R. Efficient simulation of blood flow past complex endovascular devices using an adaptive embedding technique[J]. IEEE transactions in medical imaging, 2005, 24(4): 468-476.

[6] Moore S, David T, Chase J G, Arnold J, Fink J. 3D models of blood flow in the cerebral vasculature[J]. Journal of Biomechanics, 2006, 39(8): 1454-1463.

[7] Steinman D A. Image-based CFD modeling in realistic arterial geometries[J]. Annals of biomedical Engineering, 2002, 30(4): 483-497.

[8] Steinman D A, Vorp D A, Ethier C R. Computational modeling of arterial biomechanics: Insights into pathogenesis and treatment of vascular disease[J]. Journal of Vascular Surgery, 2003, 37(5): 1118-1128.

[9] David A S, Jonathan B T, Hanif M, et al. Reconstruction of carotid bifurcation hemodynamics and wall thickness using computational fluid dynamics and MRI[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2002, 47: 149-159.

[10] Steinman D A. Image-based computational simulation of flow dynamics in a giant intracranial aneurysm[J]. American journal of neuroradiology, 2003, 24(4): 559-566.

[11] Steinman D A. Image-based computational fluid dynamics: a new paradigm for monitoring hemodynamics and atherosclerosis[J]. Curr Drug Targets Cardiovasc Haematol Disord, 2004, 4(2): 183-97.

[12] Hao Liu. Issues on computational modeling for computation-aided diagnosis[J]. Computational biomechanics, 2001, 111-116.

[13] Tomoaki H, Hao L, Ryutaro H. A MRI Based Semi-Automatic

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Modeling System for Computational Biomechanics Simulation [C] //Proceedings of the International Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality. Hong Kong, China, 2001: 282-285.

[14] Augst AD, Ariff B, Thom S, et al. Analysis of complex flow and the relationship between blood pressure, wall shear stress, and intima-media thickness in the human carotid artery[J]. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 2007, 293(2): 1031-1037.

[15] Charles A. Taylor. Simulation-based medical planning for cardiovascular disease: challenges and opportunities[C] //2003 Summer Bioengineering Conference, June 25-29, Sonesta Beach Resort in Key Biscayne, Florida, U.S.A.

[16] Taylor CA, Draney MT, Ku JP, et al. Predictive medicine: computational techniques in therapeutic decision-making[J]. Computer-aided surgery, 1999, 4(5): 231-274.

[17] Nathan W, Kenneth W, Robert W D, et al. A Software Framework for Creating Patient Specific Geometric Models from Medical Imaging Data for Simulation Based Medical Planning of Vascular Surgery[C] //In Medical Image Computing and computer-Assisted intervention (MICCAI), 4th International Conference, Utrecht, The Netherlands, 2001: 14-17.

[18] Sean A A, Charles A T. Simulation-based medical planning for cardiovascular disease: Visualization system foundations[J]. Computer Aided Surgery, 2000, 5: 82-89.

[19] SimBio: A generic environment for bio-numerical simulation[EB/OL]. http://www.simbio.de.

[20] Hose D R, Lawford P V, Narracott A J, et al. BloodSim: Coupled Solid-Fluid Simulation of Cardiovascular Systems[EB/OL]. http://www.software.aeat.com/cfx/European_Projects/bloodsim.

[21] Kerem P, Brian W, Kirk K, et al. Patient-specific surgical planning and hemodynamics computational fluid dynamics optimization through free-form haptic anatomy editing tool (SURGEM)[J]. Med Biol Eng Comput, 2008, 46: 1139-1152.

[22] Sundareswaran, K S, de Zelicourt, Pekkan, D, et al. Anatomically Realistic Patient-Specific Surgical Planning of Complex Congenital Heart Defects Using MRI and CFD[C] //29th Annual International Conference of the IEEE, 2007: 202-205.

[23] 蒋文涛, 樊瑜波, 邹远文, 等. 窦部对称狭窄对颈动脉内流场影响的数值研究[J]. 力学学报, 2006, 38(2): 270-275.

[24] 蒋文涛, 樊瑜波, 邹远文, 等. 动脉分岔血管内膜增生过程的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2007, 24(5): 597-601.

[25] 张治国, 樊瑜波, 邓小燕, 等. 一种带有旋动流引导器的新型小口径人造血管流场的数值模拟[J]. 中国科学 C辑: 生命科学, 2008, 38(9): 807-815.

[26] 岑人经, 贺继刚, 袁华, 等. 血管介入治疗中的血流动力学问题[J]. 医用生物力学, 2003, 18(2): 114-119.

[27] 邱霖, 陈榕生, 岑人经, 等. 分岔动脉血管脉动血流的动力学分析[J]. 生物医学工程研究, 2004, 23(2): 67-70.

[28] Qiao A, Liu Y. Medical application oriented blood flow simulation[J]. Clinical Biomechanics, 2008, 23(SUPPL. 1): 130-S136.

[29] 邓小燕, 刘柳军, 王贵学. 脉动流条件下动脉狭窄血管内脂质浓度极化现象的计算机数值模拟[J]. 计算力学学报, 2005, 22(1): 25-31.

[30] 乔爱科, 刘有军, 伍时桂. 弯曲动脉的血流动力学数值分析[J]. 计算力学学报, 2003, 20(2): 155-163.

[31] QIAO A K, GUO X L, WU S G, et al. Numerical study of nonlinear pulsatile flow in S-shaped curved arteries[J]. Medical Engineering & Physics, 2004, 26(7): 545-552.

[32] 刘有军, 乔爱科, 主海文, 等. 颈动脉分支的血流动力学数值模拟[J]. 计算力学学报, 2004, 21(4): 475-480.

[33] Qiao A K, Liu Y J, Li S Y, et al. Numerical simulation of physiological blood flow in 2-way coronary artery bypass grafts[J]. J Biol Phys, 2005, 31(2): 161-182.

[34] Qiao A, Matsuzawa T. Hemodynamic simulation in a novel design for femoral bypass grafts[J]. Biorheology, 2007, 44(2): 103-124.

[35] Qiao A, Gu Z, Meng X. Simulation of hemodynamics in bypassed aortic dissection[C] //2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE 2008: 1851-1854.

[36] 乔爱科, 李晓阳, 张宏家. 主动脉夹层形成、扩展和治疗的力学机理研究[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(9): 959-963.

[37] Kartik S Sundareswaran, Diane de Zelicourt, Kerem Pekkan, et al. Anatomically realistic patient specific surgical planning of complex congenital heart defects using MRI and CFD[C] //Proceedings of the annual international conference of the IEEE EMBS, Lyon, France, 2007: 202-205.

[38] Jarek R, Kerem P, Brian W, et al. Surgem: Interactive patient-specific anatomy editor for hemodynamics analysis and surgery planning[R]. Tech Report GIT-GVU-06-15, January 9, 2007.

[39] Tabor G, Tame D, Pierron F, et al. Patient-specific arterial flow simulation with additional geometric elements[C] //European conference on computational fluid dynamics, Tu Delft, The Netherlands, 2006: 1-12.

(下转第 407页)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

search, 2002, 108(1): 129-137.

[41] Kurz KD, Main BW, Sandusky GE. Rat model of arterial thrombosis induced by ferric chloride[J]. Thromb Res, 1990, 60(4): 269-280.

[42] Zeng M, Zhang H, Lowell C, et al. Tumor necrosis factor-alpha-induced leukocyte adhesion and microvessel permeability[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2002, 283(6): H2420-H2430.

[43] O'Brien JR. Shear-induced platelet aggregation[J]. The Lancet, 1990, 335(8691): 711-713.

[44] Muga KM, Melton LG, Gabriel DA. A flow dynamic technique used to assess global hemostasis[J]. Blood Coagulation & Fibrinolysis, 1995, 6(1): 73-78.

[45] Reinisch JF, Bresnick MD, Walker JW, et al. Deep venous thrombosis and pulmonary embolus after face lift: A study of incidence and prophylaxis[J]. Plastic and Reconstructive Surgery, 2001, 107(6): 1570-1575.

[46] Grabowski EF. Thrombolysis: flow and vessel wall interactions[J]. Journal of Vascular and Interventional Radiology, 1995, 6(Suppl 2): 25-29.

[47] Noren D, Palmer H, Frame MD. Predicted wall shear rate gradients in T-type arteriolar bifurcations[J]. Biorheology, 2000, 37(5-6): 325-340.

[48] Turitto V, Hall C. Mechanical factors affecting hemostasis and thrombosis[J]. Thrombosis Research, 1998, 92(Suppl 2): 25-31.

[49] Reinhart WH. Shear-dependence of endothelial functions[J]. Experientia, 1994, 50(2): 87-93.

(上接第 400页)

[40] Tabor G, Buis X, Fureder R, et al. On automating the generation of CFD models based on 3D data: industrial and biomechanical applications[J]. European congress on computational methods in applied science and engineering, 2004: 24-28.

[41] Li Z, Kleinstreuer C. Fluid-structure interaction effects on sac blood pressure and wall stress in a stented aneurysm[J]. Journal of biomechanical engineering, 2005, 127: 662-671.

[42] Bozidar P, Dusan H, Damjan Z, et al. Construction of patient specific virtual models of medical phenomena[J]. Informatica, 2005, 29: 209-218.

[43] Guntram Bert. Image-based unstructured 3D mesh generation for medical applications[C]//European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2004), Jyvaskyla, 24-28 July 2004.

[44] Gibson AP, Riley J, Schweiger M, et al. A method for generating patient-specific finite element meshes for head modeling[J]. Physics in Medicine and Biology, 2003, 48: 481-495.

[45] Marco V, Marjo D, Fulvia T, et al. Three-dimensional shape reconstruction and finite element models to be used in clinical studies[J]. J Biomech, 2004, 37: 1597-1605.

[46] Baghdadi L, Steinman DA, Ladak HM. Template-based finite-element mesh generation from medical images[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2005, 77(1): 11-21.

[47] Pekkan K, de Zelicourt D, Ge L, Sotiropoulos F, Frakes D, Fogel MA, Yoganathan AP. Physics-driven CFD modeling of complex anatomical cardiovascular flows-a TCPC case study[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2005, 33(3): 284-300.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net