

文章编号:1004-7220(2013)06-0677-07

血流动力学的医学应用与发展

白帆¹, 刘有军¹, 谢进生², 丁金立¹, 王枫¹, 赵夕¹, 任晓辰¹, 乔爱科¹

(1. 北京工业大学 生命科学与生物工程学院, 北京 100124; 2. 北京安贞医院 心脏外科, 北京 100029)

摘要: 血流动力学是指血液在血管系统中流动的力学, 主要研究血流量、血流阻力、血压、切应力、扰动流等, 以及它们之间的相互关系, 对人类生命健康具有重要的影响。血流动力学在血管的弯曲、狭窄、堵塞、分叉以及肿瘤的治疗等方面具有重要的临床研究意义。目前, 血流动力学在动脉血管搭桥、冠状动脉狭窄、腹主动脉瘤、动脉粥样硬化、脑动脉瘤以及旋涡流等方面引起广泛研究。伴随着血流动力学的深入研究, 心脑血管的手术规划、介入治疗等得到快速发展, 基于血流动力学的临床检测和治疗仪器也越来越多。血流动力学因素, 如血管压力、血管阻力、血流量、壁面切应力、血液黏度、流动分离、湍流、涡流等对常见血管疾病以及术后并发症的影响机理正在逐步深入探索之中, 并已经取得了一定成果。

关键词: 血流动力学; 动脉疾病; 手术规划; 介入治疗; 医疗仪器

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Recent development and application of hemodynamics

BAI Fan¹, LIU You-jun¹, XIE Jing-sheng², DING Jin-li¹, WANG Feng¹, ZHAO Xi¹, REN Xiao-chen¹, QIAO Ai-ke¹ (1. College of Life Science and Bioengineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Cardiac Surgery Department, Beijing An Zhen Hospital, Beijing 100029, China)

Abstract: The study of hemodynamics, which refers to dynamics inside the blood circulation, mainly includes the flow rate, flow resistance, pressure, shear stress, disturbed flow, as well as their associations in between. Therefore, with its important significance in the clinical treatments of vessel curvature, arterial stenosis or occlusion, pathological artery branches and aneurism, study about hemodynamics is essential to human health. Currently, extensive researches on hemodynamics have been conducted with respect to artery bypass, coronary arterial stenosis, abdominal aortic aneurysm, atherosclerosis, cerebral aneurysm and swirling flow. With the development of such research on hemodynamics, surgical planning and interventional therapy have improved rapidly. The influence mechanism of hemodynamic parameters, including pressure, flow resistance, flow rate, wall shear stress, blood viscosity, flow separation, turbulent flow, vortex on the post-operation complications could be deeply explored with the help of more and more clinical apparatus and have gained some achievements.

Key words: Hemodynamics; Arterial disease; Surgery planning; Interventional therapy; Medical instrument

生物体处于力学环境之中, 力学因素影响机体整体、器官、组织、细胞和分子各层次的生物学过程。血液循环过程包含着血液流动、血细胞和血管的变形、血液和血管的相互作用等, 其中均蕴藏着丰富的

力学规律。血流动力学是血液在心脑血管系统中流动的力学, 对人类生命健康具有重要意义。血流动力学因素与动脉疾病的形成、发展和治疗存在密切联系, 对动脉中的血流动力学研究一直是生物力学

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2012-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172016), 北京市自然科学基金重点资助项目(KZ201210005006)。

通信作者: 刘有军, 教授, 博士研究生导师, Tel: (010)67396657; E-mail: lyjlma@bjut.edu.cn。

和生物医学工程研究的热点^[1-2]。

心血管系统中常见的动脉病变有内膜增生、粥样硬化、动脉瘤和血栓症等。在大量复杂的生理学和生物力学因素中,一些异常和不均匀的血流动力学特征如涡流、长粒子滞留时间、高压、低壁面切应力、振荡的壁面切应力等,被普遍认为是动脉病变重要的原因^[3-6]。动脉粥样硬化总是呈现高度的病灶性而无明显的个体差异,即动脉粥样硬化早期的斑状沉积大都会发生于冠状动脉、颈动脉、腹主动脉、股动脉等的复杂流动区域,而其他动脉中则不发生或基本不发生这样的病变^[7-9]。动脉瘤常常发生在腹主动脉或为大脑供血的小动脉中,而在肢体动脉中则从不发生这样的病变^[10-11]。这些病变部位的血液流动常常伴随着流动分离、回流、二次流等复杂流动现象(见图1),而这些复杂流动全部是由动脉的分岔、弯曲等所引起的。研究表明,血流动力学因素如壁面切应力、壁面切应力梯度、流动分离、二次流等,对动脉血管内皮细胞损伤、动脉内膜加厚、内膜平滑肌细胞增生和内膜结缔组织接合,以及对聚集单核血细胞、血小板和巨噬细胞等,都有着重要影响^[12-13]。人们由此相信,这些病灶部位的局部血流动力学因素在动脉粥样硬化的发生和发展过程中起着决定性的作用^[1-2,14]。

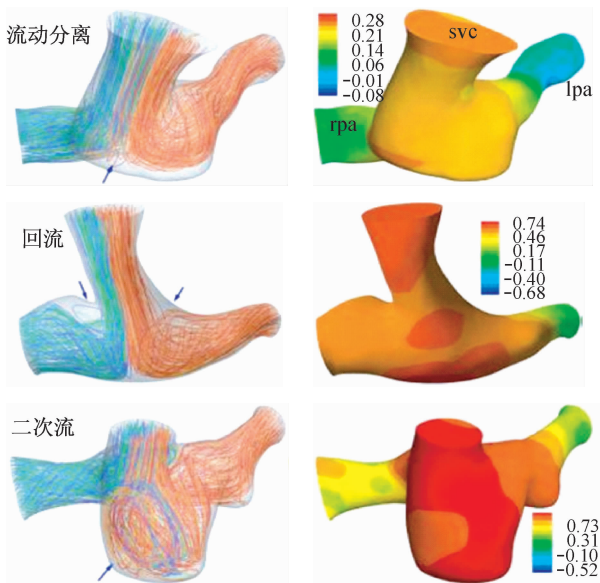


图1 流动分离、回流、二次流示意图

Fig.1 Schematic of the flow separation, reflux, secondary flow

1 数值模拟在血流动力学方面的应用

血管内血流动力学信息最直接、最准确的获取方法即从人体中直接测量。但是出于多种社会因素和技术限制,直接对人体进行测量存在较大的局限性。利用动物实验和离体实验进行血流动力学测量的方法较为常用,通过这些方法能够较好地获取血管内部大概的血流状态、血管压力和血流量等,却难以观测局部细节的血流状况^[15-17]。随着计算机技术和图形处理技术的快速发展,计算流体力学逐渐成为血流动力学计算和分析的重要方法。基于有限元法和控制体积法的生物流体计算软件大量出现。通过计算,可以直观地观察到血管内部的三维流场细节,例如涡流、二次流、流动分离等,同时也可以获取感兴趣部位的壁面切应力、压力、血流速度等血流动力学参数,与实验的方法相比,更具优越性。由于计算结果与所给定的边界条件、材料属性、网格大小、计算收敛精度等多个因素存在直接联系,故计算结果必然存在一定的误差。经临床试验对比,目前计算流体力学得到的血流动力学信息较好地符合临床实际测量结果,其有效性得到众多临床医生的认可,对临床具有一定的意义。因此,基于血流动力学的计算流体力学在心脑血管的研究方面得到广泛应用,尤其是在先天性心脏病的检查和辅助手术决策、动脉瘤破裂的预防、动脉血管血栓的血流动力学分析、病变血管壁生物力学机制的探索、植入支架后血管内环境的改变等方面^[18-20](见图2)。

动脉血管在计算流体力学计算中,多数情况下,血液被简化成统一密度和黏度的牛顿流体,对于非牛顿流体的计算较为少见,该问题目前已引起了部分关注。如 Chitra 等^[21]通过对全腔静脉吻合手术的非牛顿流体的仿真研究,解释说明了非牛顿在血流动力学仿真中的重要性,认为非牛顿流体仿真有一定的实际意义。此外,随着年龄的增长,血管系统也处于生长发育的状态,目前的计算流体力学方法主要计算当前生理条件和血管形态下的血流动力学信息,忽略了对生长条件下血流动力学信息的计算,血流动力学计算与血管生长的关系也是未来要考虑的重要方面。血管属于软组织,血管壁具有一定的弹性,以往的计算流体力学大多忽略了血液流动与血管壁之间的相互作用;为了解决这一难题,流固耦

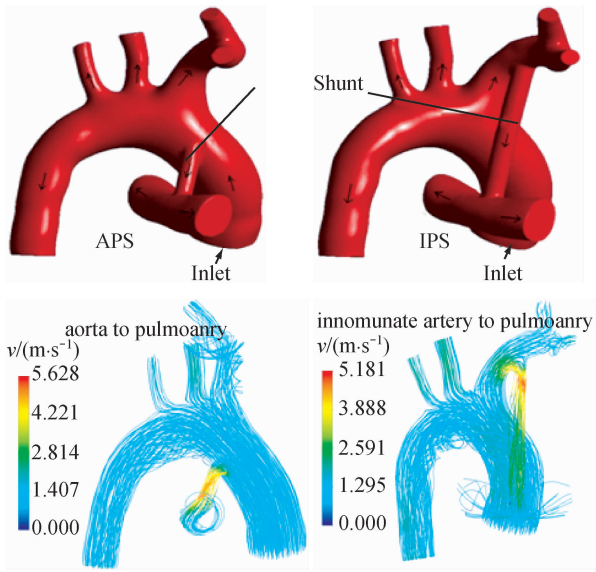


图2 体肺分流术的血流动力学模拟仿真
Fig.2 Hemodynamic simulation of the blalock-taussig shunts

合的计算方法处于快速发展过程中^[22],如 Papaharilaou 等^[23]分别采用纯流体计算和流固耦合模型计算研究了腹主动脉瘤,结果显示无论流动状态还是剪切应力分布都存在明显差异,对于血管瘤方面的研究需要考虑流固耦合的计算。

2 血流动力学与心血管外科手术规划

血液在血管内流动的血流动力学因素,对心血管疾病手术及术后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变化,也会导致血流动力学的明显差异。因此,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素。

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血流动力学参数的数值计算和比较,从而优化心血管外科手术的血流动力学状况,降低动脉疾病的危险性,辅助医学临床手术决策,以保证手术的长期有效性。Stanford 大学的 Taylor 等^[24-25]最早

建成了世界上第一个虚拟血管系统实验室,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。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^[18,26-27](见图3)。基于这一理念,Pen-natia 等^[28]通过血流动力学的优化研究了治疗单心室疾病的 Fontan 手术优化。在国内,孙琦等^[29]研究了双向 Glenn 手术的血流动力学特征,为治疗单心室先天性疾病提供了重要的血流动力学依据。丁金立等^[30]研究了单心室治疗的 TCPC 手术的血流动力学优化,以及法洛氏三联症病人相应的体肺分流术手术优化,并建立了一套手术规划系统用以辅助心血管疾病的临床手术决策。

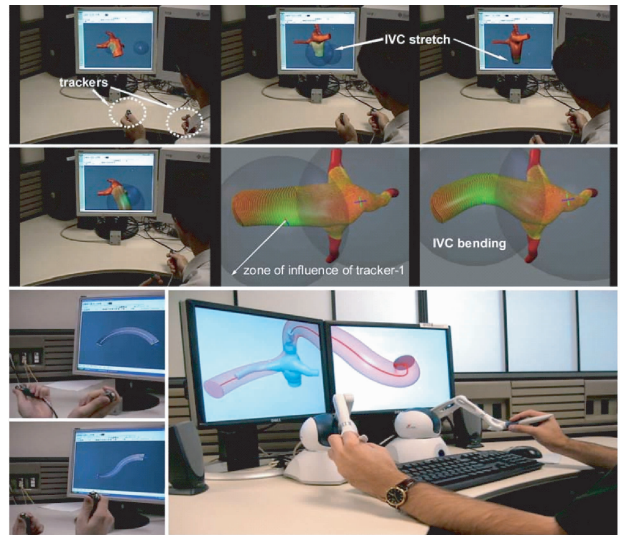


图3 利用手术规划系统对手术进行优化
Fig.3 Optimization with system of surgical planning

3 血流动力学与血管介入治疗

血管内支架(endovascular stent, ES)介入手术是治疗心血管病的重要选择,其手术特点为创伤小、风险低、术后并发症少。全世界每年大约有300万人接受血管内支架手术治疗^[31]。但是,血管内支架在临床植入部位可能会发生血管再狭窄。据统计,支架植入6个月后,再狭窄率高达20%~30%^[32]。

一些研究表明,血流动力学方面的因素也是支架植入后,血管再狭窄的一个重要的致病原因。血管内支架的植入会对血流产生不利的扰动^[33-34],导致血流产生流动分离,使支架处区域的流动剪应力发生不利的改变^[35]。血液流动的这些异常变化与再狭窄的发生存在相关性^[36]。邓小燕等^[37]的理论研究结果表明,动脉狭窄远端的扰动流能够增强血液与动脉壁接触面上脂质的积聚,故如何抑制不利的扰动是如今血流动力学的一个研究课题。

支架置于动脉瘤口就相当于一个物理屏障,可以抑制瘤内血液流动,达到治疗的目的。为了提高支架治疗动脉瘤的效果,仅靠降低支架的通透率是行不通的。因为较低的通透率会使支架和血管壁之间的生物相容性变差;同时,较低的通透率也会使金属支架的弹性变差,不利于支架的压缩以及通过形状较为复杂的血管。因此,实际使用的支架通透率是有一定范围的。在生理条件下实际使用的支架通透率范围为60%~86%,而这一范围数值的下限是通过使用2个支架层叠来实现的。不同结构形状或者不同网丝截面的支架对动脉瘤血流动力学特性具有不同的影响。已经有许多学者对圆型及矩形截面支架对脑动脉瘤血流动力学的影响进行了研究^[38-39]。如曾堃等^[19]研究了相同通透率条件下不同网丝截面形状的支架对脑动脉瘤血流动力学的影响(见图4)。

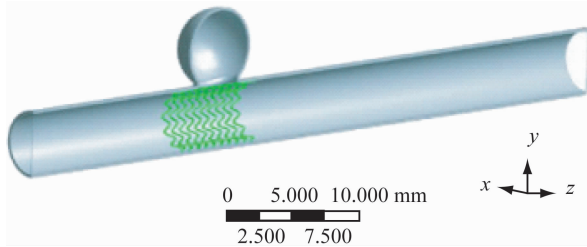


图4 血管与支架装配模型

Fig. 4 Assembly model of the vessel and stent

4 基于血流动力学检测和优化的生物器械

血流动力学检测技术在临床疾病诊断与生物研究中有广泛的应用,目前有很多应用的实例,例如GE公司的Vivid E9彩色多普勒超声诊断系统、迈瑞公司的iPM9800血流动力学监护仪和飞利浦公司

的Philips Ambient Experience Interventional Suite(见图5)。在国内,李洁等^[40]应用彩色多普勒超声技术观察糖尿病患者眼部视网膜中央动脉(CRA)、睫状后动脉(PCA)、眼动脉(OA)血流动力学改变,旨在研究眼部血管血流动力学对糖尿病视网膜病变发生发展的相关性,探讨彩色多普勒血流显像技术在糖尿病视网膜病变中应用价值。刘皎然等^[41]运用颅脑超声对大脑前动脉的血流动力学检测,并通过大脑前动脉血流动力学的变化在早期筛选出颅内室管膜下出血高危患儿,并及时加以关注和预防性治疗,从而指导临床早期预防性治疗和判断已经发生颅内室管膜下出血患儿治疗效果及预后,规划后期治疗具有重要临床应用价值。于飞等^[42]利用胸腔电生物阻抗的方法测量人体血流动力学和心脏功能,分析了代谢综合征对心脏血流动力学影响的特点,中心性肥胖、脂质代谢紊乱、高血压及糖代谢异常这些代谢综合征相关危险因素对血流动力学的影响及其合并存在时心脏功能的改变,以确定无创血



图5 血流动力学检测器械

Fig. 5 Ultrasonic doppler blood flow instruments

流动力学监护系统在代谢综合征及相关危险因素中的监测价值,为代谢综合征的防治提供依据。

在人工组织与动物组织移植的研究中,移植材料的选取、手术成功与否都要根据术后血流动力学表现来评定。因此,移植组织作为一种新型的医疗设备,在很多研究与应用中都需要得到良好的血流动力学表现支持。黄文等^[43]在对膨体聚四氟乙烯人工血管补片移植的研究中发现内皮细胞可以覆盖 e-PTFE 材料表面,其内膜增生主要是平滑肌细胞和胶原纤维增生引起。主要原因可能是内皮细胞慢性损伤、血小板聚集、血流动力学改变、材料与血管顺应性不一致等。Deng 等^[44]在研究血管材料水渗透性与搭桥血管多孔性和手术成功率与手术时效性的关系时,提出过高的水渗透性会影响血细胞与搭桥血管的相互作用,会提高搭桥失败的可能性。Jamieson 等^[45]研究了牛心包瓣在治疗心脏瓣膜变异疾病时的应用,根据临床数据发现手术后病人心脏关注区域具有良好的血流动力学指标,未出现严重的不匹配现象,且手术材料与其他移植材料(猪心包膜)相比具有更好的耐用性。此外,张鹤等^[46]根据血流动力学参数来优化人工血管结构,建立在低剪切力理论和血管结构的解剖发现等基础上,试图通过对血管内壁结构的特殊加工即加入螺旋槽结构来增加流速、阻止血栓形成和内膜增生等导致临床失败因素的发生,提高人工血管的长期通畅率。张治国等^[50]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,该旋动流可以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,有望解决小口径人造血管的血栓问题^[47-50],如图 6 所示,图 6(a)是新型与传统小口径人造血管的结构示意图, y 和 r 分别为血管的轴向与径向坐标,A-A 截面(即 $y=0$ 处)为两种血管进行血流动力学参数对比的起始位置;图 6(b)是旋流引导器的几何形状,其螺旋线的波长为 4 mm;图 6(c)是旋流引导器的

剖面图,其旋脊的横截面为半圆形,厚度 0.2 mm。

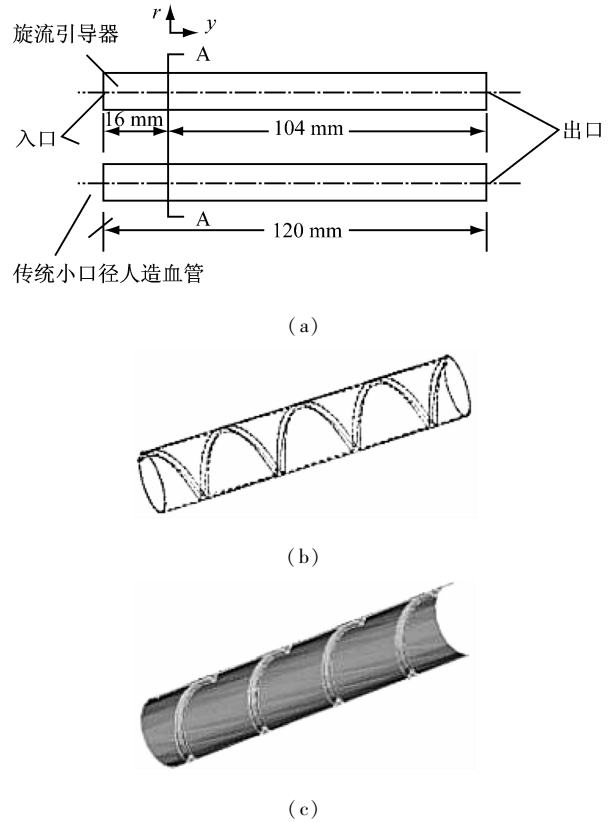


图 6 新型小口径人造血管
Fig. 6 The new artificial blood vessel with small diameter

5 结论

血流动力学因素,包括血流速度、压力、流动分离、二次流、壁面切应力、粒子滞留时间、流动紊乱等,对于人体血管系统的生理和病理研究具有重要意义。深入了解心脑血管疾病病灶部位(如动脉血管的分岔、弯曲、狭窄等处)的局部血流动力学评价指标,可以很好地揭示和定量地描述血管病变的产生和发展的情况,为临床医学的疾病预防和治疗提供重要依据。数值模拟的方法与临床血流动力学监测手段能够较为准确地获得上述血流动力学参数,对于临床手术方式的优化与设计提供科学的方法和依据。目前,研究血流动力学的学者主要以血流动力学参数评价手术的优劣,临床医生主要依据临床测量的生理指标评价手术的好坏,而各类血流动力学参数与生理指标均为心血管疾病的影响因素。要明确确定血流动力学参数与生理指标之间的定量关

系,目前还是一件比较困难的事情,导致学者与医生之间缺乏一个公认的评价标准,这是血流动力学在医学上发展与应用的一大阻力。

随着数值模拟方法的逐步发展,一些新的计算方法(如几何多尺度的方法、流固耦合的方法等^[51-53])也不断涌现,使得学者与医务工作者之间的交流显得更加重要。只有建立起学者与医务工作者之间畅通有效的沟通渠道,逐步减小双方评价标准之间的差异,才能让血流动力学在医学上有长足的应用和发展。

血流动力学在临床上的应用对心脑血管外科手术产生了革命性的影响,所有学者与医务工作者都应当并正在不断努力,力争实现从经验型医疗向设计型医疗的过渡。

参考文献:

- [1] 乔爱科,刘有军. 面向医学应用的血流动力学数值模拟(I): 动脉中的血流[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(2): 189-196.
- [2] 乔爱科,刘有军,贯建春,等. 面向医学应用的血流动力学数值模拟(II): 前景展望[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(5): 544-550.
- [3] 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.
- [4] 王溪涛,张炎,刘波,等. 低切应力对动脉粥样硬化形成及血管平滑肌细胞 α -肌动蛋白和c-Myc蛋白表达的影响[J]. 解剖学报, 2004, 35(6): 671-614.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Schwartz CJ, Mitchell JAR. Observation on localization of arterial plaques [J]. *Circ Res*, 1962, 11: 63-73.
- [8] Mayer WW, Noll M. Gross patterns of early deposits in the carotid artery and their relation to the preformed arterial structures [J]. *Artery*, 1974, 1: 31-45.
- [9] 赵淑芝,辛朝晖,袁慧云,等. 动脉粥样硬化与局部血流动力学相关性研究[J]. 医学影像学杂志, 2006, 16(7): 682-684.
- [10] Stehens WE. Focal intimal proliferations in the cerebral arteries [J]. *Am Pathol*, 1960, 36(3): 289-301.
- [11] Caro CG, Nerem RM. Transport of ^{14}C -cholesterol between serum and wall in the perfused dog common carotid artery [J]. *Circ Res*, 1973, 32: 187-205.
- [12] Liou TM, Liou SN, Chu KL. Intra-aneurysmal flow with helix and mesh stent placement across side-wall aneurysm pore of a straight parent vessel [J]. *J Biomech Eng*, 2004, 126(2): 36-43.
- [13] Jeng JC, Shu C. Effects of disturbed flow on vascular endothelium: Pathophysiological basis and clinical perspectives [J]. *Physiol Rev*, 2011, 91(1): 327-387.
- [14] Qiao A, Liu Y. Medical application oriented blood flow simulation [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(Suppl 1): 130-136.
- [15] Pekkan K, Kitajima H, Forbess J, et al. Total cavopulmonary connection flow with functional left pulmonary artery stenosis—fenestration and angioplasty in vitro [J]. *Circulation*, 2005, 112(21): 3264-3271.
- [16] 于建民. CABG术后竞争血流与血管活性药物对动脉桥、静脉桥血流影响的实验研究[D]. 济南: 山东大学博士学位论文, 2006.
- [17] Bertolotti C, Qin Z, Lamontagne B. Influence of multiple stenosis on Echo-Doppler functional diagnosis of peripheral arterial disease: A numerical and experimental study [J]. *Ann Biomed Eng*, 2006, 34(4): 564-574.
- [18] 刘有军,乔爱科. 基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划进展[J]. 医用生物力学, 2009, 24(6): 395-400.
Liu YJ, Qiao AK. Progress of basod on hemodynamics simulation cardiovascular surgical planning [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(6): 395-400.
- [19] 曾堃,乔爱科. 三种界面支架对动脉瘤血流动力学影响的比较研究[J]. 医用生物力学 2012, 27(2): 220-226.
Zeng K, Qiao AK. Comparative study on effects from three kinds of stents with different cross-section on aneurysmal hemodynamics [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(2): 220-226.
- [20] Dasi LP, de Zelicourt D, Pekkan K. Hemodynamic performance of stage-2 univentricular reconstruction: Glenn vs. Hemi-Fontan Templates [J]. *Ann Biomed Eng*, 2009, 37(1): 50-63.
- [21] Chitra K, Sundararajan T, Vengadesan S, et al. Non-Newtonian blood flow study in a model cavopulmonary vascular system [J]. *Int J Numer Methods Fluid*, 2011, 66(3): 269-283.
- [22] Einstein DR, Del Pin F, Jiao X, et al. Fluid - structure interactions of the mitral valve and left heart: Comprehensive strategies, past, present and future [J]. *Int J Numer Methods Eng*, 2010, 26(3-4): 348-380.
- [23] Papaharilaou Y, Ekaterinaris JA, Manousaki E, et al. A decoupled fluid structure approach for estimating wall stress in abdominal aortic aneurysms [J]. *J Biomech*, 2007, 40(2): 367-377.
- [24] Taylor CA, Figueroa CA. Patient-specific modeling of cardiovascular mechanics [J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2009, 11: 109-134.
- [25] Taylor CA, Draney MT, Ku JP, et al. Predictive medicine: Computational techniques in therapeutic decision-making [J].

- Comput Aided Surg, 1999, 4(5): 231-274.
- [26] Pekkan K, Whited B, Kanter 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(11): 1139-1152.
- [27] Fu WY, Gu ZY, Meng XL, *et al.* Numerical simulation of hemodynamics in stented internal carotid aneurysm based on patient-specific mode [J]. *J Biomech*, 2010, 43(7): 1337-1342.
- [28] Pennatia G, Migliavacca F, Dubinia G. Modeling of systemic-to-pulmonary shunts in newborns with a univentricular circulation; State of the art and future directions [J]. *Prog Pediatr Cardiol*, 2010, 30(1-2): 23-29.
- [29] 孙琦, 刘锦纷. 计算流体力学在 Fontan 手术循环血流模拟中的应用 [J]. *中华胸心血管外科杂志*, 2009, 25(6): 419-420.
- [30] Ding JL, Chai LJ, Liu YJ. Hemodynamic based cardiovascular surgical planning system [C]. //2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. Yantai, China; [s. n.], 2010; 290-293.
- [31] 朱爱萍, 沈健. 血管内支架的研究进展 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2003, 20(3): 537-540.
- [32] Elezi S, Kastrati A, Neumann FJ, *et al.* Vessel size and long term outcome after coronary stent placement [J]. *Circulation*, 1998, 98(18): 1875-1880.
- [33] Ladisa JF, Guler I, Olson LE, *et al.* Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of alterations in coronary wall shear stress produced by stent implantation [J]. *Ann Biomed Eng*, 2003, 31(8): 972-980.
- [34] He Y, Duraiswamy N, Frank AO, *et al.* Blood flow in stented arteries: A parametric comparison of strut design patterns in three dimensions [J]. *J Biomech Eng*, 2005, 127(4): 637-647.
- [35] LaDisa JF Jr, Olson LE, Guler I, *et al.* Circumferential vascular deformation after stent implantation alters wall shear stress evaluated with time dependent 3D computational fluid dynamics models [J]. *J Appl Physiol*, 2005, 98(3): 947-957.
- [36] Wentzel JJ, Krams R, Schuurbiens JCH, *et al.* Relationship between neointimal thickness and shear stress after wall stent implantation in human coronary arteries [J]. *Circulation*, 2001, 103(13): 1740-1745.
- [37] Deng XY, Fatourae N, Guidoin R. Numerical simulation of low density lipoprotein (LDL) transport in arterial stenosis [C]// Proceedings of the IASTED International Conference on Biomechanics. New York; [s. n.], 2004; 94-96.
- [38] 张宏斌, 张赞, 曾堃. 半圆形截面支架介入串联囊状动脉瘤的血流动力学仿真 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2010, 29(1): 123-128.
- [39] 顾兆勇, 张宏斌, 孟宪龙, 等. 支架植入颅内蜿蜒型动脉瘤的血流动力学仿真 [J]. *医用生物力学*, 2009, 24(1): 64-69.
- Gu ZY, Zhang HB, Meng XL, *et al.* Simulation of hemodynamics in stent Intervention of basilar sinuous aneurysms [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(1): 64-69.
- [40] 李洁. 超声彩色多普勒对糖尿病眼部血管血流动力学研究 [D]. 天津: 天津医科大学硕士学位论文, 2010.
- [41] 刘皎然. 超声诊断新生儿室管膜下出血及血流动力学研究 [D]. 石家庄: 河北医科大学硕士学位论文, 2011.
- [42] 于飞. 代谢综合征患者微创心脏血流动力学的临床研究 [D]. 济南: 山东医科大学硕士学位论文, 2010.
- [43] 黄文, 时德, 赵瑜. 犬膨体聚四氟乙烯人工血管补片移植后的组织形态学研究 [J]. *重庆医科大学学报*, 2003, 28(2): 144-146.
- [44] Deng X, Guidoin R. Alternative blood conduits: assessment of whether the porosity of synthetic prostheses is the key to long-term biofunctionality [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2000, 38(2): 219-225.
- [45] Jamieson WR, Koerfer R, Yankah CA, *et al.* Mitroflow aortic pericardial bioprosthesis — Clinical performance [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2009, 36(5): 818-824.
- [46] 张鹤. 人工血管螺旋槽槽结构模型的初步研究 [D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2007.
- [47] Fan YB, Xu ZP, Jiang WT, *et al.* An S-type bypass can improve the hemodynamics in the bypassed arteries and suppress intimal hyperplasia along the host artery floor [J]. *J Biomech*, 2008, 41(11): 2498-2505.
- [48] Liu X, Fan Y, Deng X. Effect of spiral flow on the transport of oxygen in the aorta: A numerical study [J]. *Ann Biomed Eng*, 2010, 38(3): 917-926.
- [49] Zhan F, Fan YB, Deng XY. Swirling flow created in a glass tube suppressed platelet adhesion to the surface of the tube; Its implication in the design of small-caliber arterial grafts [J]. *Thromb Res*, 2010, 125(5): 413-418.
- [50] 张治国, 樊瑜波, 邓小燕. 一种带有旋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.
- [51] Liang FY, Takagi S, Himeno R, *et al.* Multi-scale modeling of the human cardiovascular system with applications to aortic valvular and arterial stenoses [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2009, 47(9): 743-755.
- [52] Lagana K, Balossino R, Migliavacca F, *et al.* Multiscale modeling of the cardiovascular system; Application to the study of pulmonary and coronary perfusions in the univentricular circulation [J]. *J Biomech*, 2005, 38(5): 1129-1141.
- [53] Radaelli AG, Peiro J. On the segmentation of vascular geometries from medical images [J]. *Int J Numer Meth Biomed Eng*, 2010, 26(1): 3-34.