

- ▶ 科研成果
- ▶ 研究专题
- ▶ 获奖

人工心脏流固耦合模拟研究取得进展

[【大中小】](#) [【打印】](#) [【关闭】](#)

2019-02-18 | 编辑: 文/材料环境部

在很多实际应用中,多个物理场(如温度场、应力场、速度场等)叠加在一起,这些物理场之间的相互作用给理论研究、实验以及数值模拟带来了巨大的挑战。多物理场耦合问题就是要分析多个物理场之间的交互作用,例如:流固耦合分析、热应力问题、压电分析等等。多物理场耦合问题的数值模拟不仅需要求解多个不同物理场(不同模型、不同尺度、不同特性),还需要解决它们之间的非线性耦合。设计适合多物理场耦合问题的高效数值求解方法、高效地使用并行计算机进行大规模数值模拟、提高算法的可扩展性和计算效率等是求解复杂耦合问题的重点。流固耦合问题是多物理场研究的热点问题之一,它是一类典型的高性能科学计算问题,其应用涵盖了许多重要的高性能计算领域,其数值模拟亦涉及到的共性计算方法,如网格变形、多网格匹配、界面问题、非线性耦合求解等。

心力衰竭(心衰)是血管疾病的最终阶段,高血压、动脉狭窄、缺血性心肌病等各种心血管疾病都可能导致心衰的发生。研究表明,心衰患者的心脏力学特性与循环系统的血流动力学特性都出现了明显恶化。心力衰竭一方面会导致心脏的力学性能恶化、心肌供血减少,另一方面还会导致心脏的耗氧量增加、心脏负担加重。血流动力学与自主调节系统的这种恶性循环使得心衰病程会逐渐加重,也使心衰成为难治性心脏病之一。人工心脏(LVAD)作为打破心衰的恶性循环的有效治疗方法,近年来引起了广泛的关注。中国每年有800万左右患者等待心脏外科治疗,其中等待心脏移植的患者每年超过一万人,这些患者中的大多数不适合做心脏移植或需要等待移植,只能靠人工心脏维持生命。

研究发现,长期使用人工心脏辅助治疗会产生一系列心脏形态功能、循环系统血流动力学、自主调节系统活性以及人体内环境方面有利的改变。但研究也发现不适当的LVAD辅助水平和辅助时间会损伤心脏与血管的结构与功能。目前,在LVAD对循环系统血流动力学影响机理方面,血流动力学数值模拟与循环系统流固耦合模拟起到至关重要的作用。但是,由于循环系统的几何结构复杂性、生物组织材料的非线性、以及流固耦合算法的复杂性,对人工心脏泵及心血管的数值模拟还存在着很多困难。

流固耦合模拟是解决临床心血管系统的血流动力学问题的重要方法之一,然而心血管系统模型的复杂性导致现有流固耦合计算软件不能满足临床需求。首先,心血管系统的空间具有不规则、非对称以及血管壁分层等特点。为了获得可靠的计算结果,需要增加血管壁的网格数,使用较小的网格尺寸。这样做就导致模型网格数急剧增多,增加了流固耦合的计算量。其次,血管壁的力学特性复杂,目前研究认为血管壁是一种各向异性的超弹性材料。这种复杂的本构关系会极大增加流固耦合的计算量并增大流固耦合算法收敛的难度。最后,由于在一个心动周期内,血管会发生较大形变,传统的流固耦合算法不能很好地解决模型大形变的问题,常会计算不收敛。

交叉中心能源环境部的张林波、郑伟英、张晨松和冷伟与北京大学、北医三院、北京工业大学的研究人员合作,在自然科学基金重大研究计划重点项目(NSFC-91430215)的支持下,对人工心脏泵的流固耦合模拟进行研究,针对流固耦合问题进行了高效并行数值算法研究,所取得的研究成果被应用于一些心血管疾病的预测和治疗。由于心血管系统模型的复杂性高和计算规模大,传统算法的稳定性、收敛性以及计算效率难以满足需要,项目组从建模、离散、求解、并行等几个方面对心血管环境下的人工心脏泵问题和动脉瘤问题开展了共性数值方法的研究工作,设计并实现了流固耦合并行软件平台,完成了相应算法的数值实验并进行了实验验证。项目组完成了一套流固耦合模拟并行软件平台、发表学术论文45篇、实验报告1份、获得专利6项、毕业博士生7人、培养博士后2人、举办流固耦合数值模拟国际学术会议2次和国内学术会议2次。

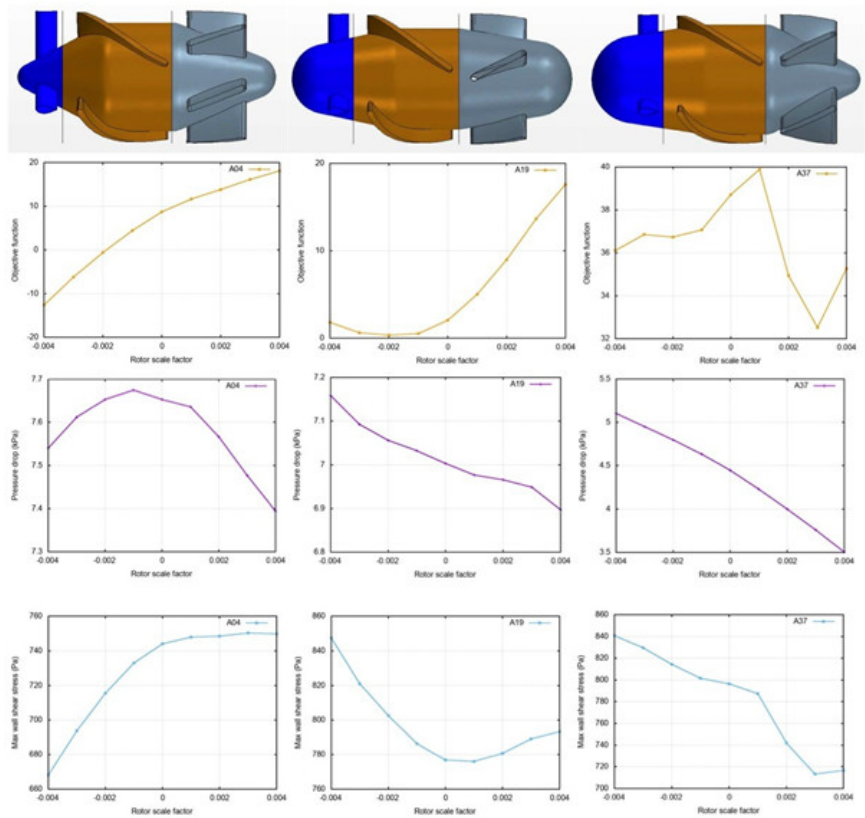


图1.利用流固耦合数值模拟进行人工心脏优化设计

通过动物实验确定了BJUT-II型人工心脏的血流动力学特性达到临床应用水平，从而验证了项目所设计的人工心脏流固耦合模拟算法的有效性，为后续人工心脏的快速迭代优化奠定了坚实的基础。项目组成功地进行了六例人工心脏动物实验（实验对象为羊、猪等大型哺乳动物），全部实验动物均健康、长期存活，人工心脏目前已经达到临床应用水平。北京工业大学团队在2015年北京科技周期间，对参观的民众进行了科普宣传，讲授人工心脏的原理和治疗效果。





云控制人工心脏泵可主动调整人工心脏的工作状态，并获得实时医嘱与建议（5月17日摄），千龙网记者 王悦摄

图2.人工心脏的动物实验（左）和在北京科技周的科普介绍（右）

项目组通过开展流固耦合的并行数值算法研究，研发一批共性的高效计算方法和程序，解决流固耦合并行模拟中的一些共性瓶颈问题。这些数学模型和数值方法的研究对大规模流固耦合系统的模拟可以发挥重要作用。在此基础之上，本项目与应用紧密结合，特别是针对心血管疾病诊断和治疗这个关系民生的应用领域，将流固耦合数值模拟应用于人工心脏泵的设计和腹主动脉瘤的预测与治疗，并利用实验数据对数值算法进行了检验和调优，这些结果对制定心衰、动脉瘤等疾病的治疗策略、提高患者的术后生存率与生活质量有重要意义。本项目所取得的成果与经验也会对其多物理耦合数值模拟（如水轮机、发动机的优化设计、评估和预测等）产生借鉴意义。



欢迎访问国家数学与交叉科学中心

地址：北京海淀区中关村东路55号 邮编：100190 电话：86-10-62613242 Fax: 86-10-62616840 邮箱：ncmis@amss.ac.cn