

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 23020101153003

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

冠状动脉狭窄血液动力学  
建模与仿真研究

Modeling and Simulation for hemodynamics  
of coronary artery stenosis

陈迎潮

指导教师姓名: 鞠颖 副教授

专业名称: 计算机技术

论文提交日期: 2013 年 4 月

论文答辩时间: 2013 年 5 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2013 年 5 月

冠状动脉狭窄血液动力学建模与仿真研究

陈迎潮

指导教师  
鞠颖  
副教授

厦门大学

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

冠状动脉性心脏病 (coronary heart disease, CHD), 简称冠心病, 是由冠状动脉各种病变导致心肌供血不足或中断所引起的心脏疾病。据世界卫生组织 2010 年报告统计, 在 2008 年估计有 1730 万人死于心血管疾病, 占全球死亡总数的 30%, 其中约 730 万人死于冠心病, 已经严重危害人类的健康。研究 CHD 病理状态下冠状动脉循环系统并分析其血液动力学特性, 对于进一步明确 CHD 发病机理和促进临床治疗手段的提高具有重要的意义。由于有创介入性临床实验存在一些禁忌症和并发症的问题, 同时也由于生理系统自身的错综复杂机制以及无扰动在体实验手段的缺乏, 通常采用建模与仿真方法研究生理系统的不同特征。

本文以冠状动脉系统的医学检测采集数据和生理特征为基础, 采用计算机数字图像处理、心血管系统电网络模型和动脉流体力学有限元分析方法, 对冠状动脉狭窄的建模与仿真中的关键问题进行研究。论文首先介绍了建模过程中涉及到的冠状动脉相关生理、病理知识, 计算机图像处理和仿真的理论基础以及生理系统建模、有限元分析常用方法。然后提出了一种改进区域生长算法, 对亮度不均的冠状动脉造影图像进行血管分割提取, 并使用 MICCAI 准则对分割后的图像进行评价。接着根据冠状动脉粥样硬化性心脏病病理特征建立冠状动脉血液循环电网络模型, 该模型能仿真冠状动脉狭窄病理情况, 并分别仿真了不同程度 (轻、中、重) 度狭窄情况。最后在此基础上, 对不同程度的冠状动脉狭窄的病异常情况进行流体力学有限元数值模拟分析, 仿真结果与临床实际生理现象相吻合。

本文的主要研究内容和创新工作如下:

1. 冠状动脉造影过程中, 由于人体骨骼、肌肉、器官等组织对 X 射线吸收程度不同, 得到的冠状动脉造影图像亮度不均匀, 传统的区域生长算法无法准确分割不均匀亮度的图像, 而且种子点的选取需要人工交互, 效率低下。针对传统区域生长算法的不足之处, 提出了一种改进区域生长算法, 该算法自动生成一组种子点, 种子点生长时, 使用生长区域的局部平均值作为生长准则中的参数, 最后使用 MICCAI 准则对分割后的图像进行评价。实验表明, 使用该算法对冠状动脉造影图像进行分割, 能得到较好的结果, 且不需要人工交互, 提高了图像分割的效率和准确性。

2. 在左心循环系统的血流动力学仿真建模的研究基础上, 结合冠状动脉粥

样硬化的病理学特点及临床数据,建立了描述心血管冠状循环与系统循环之间血液动力学关系的模拟电路模型,并运用 Matlab/Simulink 工具对模型进行仿真,模拟冠状动脉粥样硬化性心脏病病理状态下的冠状动脉循环血流情况。通过修改模型参数,能模拟不同个体生理情况特征,仿真不同程度的冠状动脉狭窄的血流情况。仿真波形与动物实验结果相吻合,通过对血流储备分数  $FFR_{myo}$  的计算,也进一步验证仿真结果的正确性。

3. 根据冠状动脉局部狭窄的特点,通过基于有限元分析的 CFD 软件 ANSYS/FLOTRAN 以心血管系统中冠状动脉血液的流动作为研究对象,对不同程度的冠状动脉狭窄的病异常情况进行数值模拟分析,得到冠状动脉内血流的速度矢量图及压力等值线图,直观地反映狭窄冠状动脉内血流场的压力变化,研究局部狭窄冠状动脉内血液流动的动力学问题,了解血液循环的规律,分析冠状动脉血流动力学因素与粥样硬化等动脉疾病之间的关系。

**关键词:** 冠状动脉性心脏病; 建模与仿真; 血液动力学; 有限元分析; 血管分割



## Abstract

Coronary heart disease (CHD for short) is one kind of heart disease caused by deficiencies in blood flow in the heart muscle. This heart disease has bad effects on human health with high incidence and mortality. The study of coronary artery circulation system and analysis of hemodynamics is important for further understand mechanisms of CHD and promote the improvement of clinical treatment. Due to not only some contraindications and complications of invasive interventional clinical trials, but also the complicated mechanism of physiological system and the lack of non-disturbance experiment in vivo, the methods of modeling and simulation is adopted to quantitative analysis of different characteristics of the physiological system with no trauma.

In this paper, we study the key issues of modeling and Simulation of coronary artery stenosis, based on the physiological characteristics of coronary artery system, using computer digital image processing, the theory of windkessel of circuit model of cardiovascular system and arterial fluid mechanics and finite element analysis method. Firstly, the paper introduces the related physiological and pathological knowledge of coronary artery, common methods of computer image processing, the theoretical basis of computer simulation and the modeling and finite element analysis methods of physiological systems. Secondly, an improved region growing algorithm for non-uniform intensity images of coronary artery angiograms is presented by this paper, and the result of our algorithm is evaluated by MICCAI criteria. Thirdly, we establish a circuit system for the study of the pathological of Coronary Heart Disease, simulate the hemodynamic status of coronary artery stenosis with different level (mild, moderate and severe). Lastly, we have the fluid mechanics finite element analysis of different degree of coronary artery stenosis. The experimental results are matched actual physiological characteristics.

The main contents and contributions of this dissertation are as follows:

1. The intensity of coronary artery angiograms is non-uniform since different organizations, such as the bones, muscles, and organs, have different absorption of

X-ray during angiography. The classical region growing algorithm has poor effect on these non-uniform intensity images, and it is also inefficient since the seeds must select manually. An improved region growing algorithm is presented by this paper, which not only produce seeds automatically, but also use a local parameter in growing criteria. Then we used MICCAI criteria to evaluate the result of our algorithm. The efficacy of the approach is demonstrated with experiments.

2. Based on previous work on some simulation experiments of arterial system on left heart-arterial interaction coincide with the pathological characteristics and clinical parameters of CHD, a dynamic simulation model was built for the system of coronary circulation on CHD by using Matlab/Simulink, characterized the hemodynamic relations between the coronary circulation and systemic circulation. This model has been digitally simulated for coronary flow of different physiology and different degree of coronary artery stenosis of CHD by changing the parameter, the results were consistent with clinical observations of animal experimentation. The correctness of the results are further verified from the calculation of the conclusion of  $FFR_{myo}$ .

3. Based on ANSYS/FLOTRAN, which is a CFD software of finite element analysis, we study the issue of dynamics of the blood flow in the coronary artery stenosis, having numerical simulation analysis of coronary artery circulation and the contour of the velocity distribution and the pressure distribution at different degree of stenosis, which lead us to observe, analyze and predict the states of the coronary blood flow and vascular circulation of CHD. We try to understand the law of blood circulation and the relationship analysis between hemodynamic factors and the disease of coronary atherosclerosis.

**Key words:** Coronary Heart Disease; Modeling and Simulation; Hemodynamics; Finite Element Analysis; Vessel Segmentation

摘要.....	I
Abstract.....	III
<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 课题的背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 本文的研究工作及创新之处.....	4
1.4 本文的组织结构.....	5
<b>第二章 冠状动脉和血管弹性腔、血液流体力学理论</b> .....	7
2.1 冠状动脉及冠状动脉狭窄.....	7
2.1.1 冠状动脉.....	7
2.1.2 冠状动脉主要功能.....	9
2.1.3 冠状动脉影响因素.....	9
2.1.4 冠状动脉狭窄和冠心病.....	11
2.2 冠心病相关临床诊断和治疗手段.....	11
2.2.1 冠心病临床诊断方法.....	11
2.2.2 冠心病临床治疗手段.....	12
2.3 冠状动脉造影图像的预处理和二维血管提取.....	13
2.3.1 冠状动脉造影图像的噪声.....	13
2.3.2 冠状动脉造影图像的畸变校正.....	14
2.3.3 冠状动脉二维血管区域提取方法.....	14
2.4 冠状动脉血液循环系统的弹性腔理论.....	15
2.4.1 弹性腔模型理论.....	15
2.4.2 心血管系统电网络模型.....	17
2.5 冠状动脉血液流体力学理论.....	18
2.5.1 有限元方法简介.....	19
2.5.2 Arbitrary Lagrange-Euler 方法简介.....	21
2.6 本章小结.....	22
<b>第三章 基于改进区域生长算法的冠状动脉造影图像分割技术</b> .....	23
3.1 传统区域生长算法.....	23
3.1.1 算法原理.....	24
3.1.2 传统区域生长算法的不足.....	24
3.2 随机种子局部生长准则的区域生长算法.....	25
3.2.1 种子点的自动生成.....	25
3.2.2 局部生长准则.....	25
3.3 实验结果及分析.....	26
3.3.1 分割结果评价准则.....	27

3.3.2 结果分析	28
3.4 本章小结	30
<b>第四章 冠状动脉血液循环电网络模型仿真研究</b>	<b>31</b>
4.1 冠状动脉血液循环模型的建立	31
4.1.1 左心室血压与容积关系	33
4.1.2 冠状动脉血压与血流关系	34
4.1.3 状态方程	35
4.2 仿真实验及结果	36
4.3 结果分析	39
4.4 搭建心脏冠状动脉循环仿真软件	41
4.4.1 冠状动脉轻度狭窄	43
4.4.2 冠状动脉中度狭窄	43
4.4.3 冠状动脉重度狭窄	44
4.5 本章小结	44
<b>第五章 冠状动脉狭窄血流 ALE 有限元分析</b>	<b>47</b>
5.1 模型的建立	47
5.1.1 冠状动脉血流的生理特征参数	48
5.1.2 冠状动脉模型的网格划分	49
5.1.3 冠状动脉模型的初始条件、边界条件和计算控制	50
5.2 仿真实验及结果	50
5.2.1 不同狭窄冠状动脉模型的血流速度变化分析	51
5.2.2 不同狭窄冠状动脉模型的压力变化分析	53
5.3 结果分析	54
5.4 本章小结	56
<b>第六章 总结和展望</b>	<b>57</b>
6.1 总结	57
6.2 展望	58
<b>参考文献</b>	<b>61</b>
<b>攻读硕士学位期间发表论文及科研情况</b>	<b>65</b>
<b>致谢</b>	<b>67</b>

## Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Background and Significance of Project</b> .....	1
<b>1.2 Research Status</b> .....	2
<b>1.3 Research and Innovation</b> .....	4
<b>1.4 Structure of Thesis</b> .....	5
<b>Chapter 2 Theory of windkessel and hemodynamics</b> .....	7
<b>2.1 coronary artery and coronary artery stenosis</b> .....	7
2.1.1 Coronary artery.....	7
2.1.2 Main function of coronary artery.....	9
2.1.3 Affecting factors of coronary artery.....	9
2.1.4 Coronary artery stenosis and coronary heart disease.....	11
<b>2.2 Clinical diagnosis and treatment of coronary heart disease</b> .....	11
2.2.1 Clinical diagnosis of coronary heart disease.....	11
2.2.2 Treatment of coronary heart disease.....	12
<b>2.3 Pretreatment and vessel segmentation of Coronary Angiography image</b> .....	13
2.3.1 Coronary artery angiography image noise.....	13
2.3.2 Coronary artery angiography image correction.....	14
2.3.3 Vessel segmentation from Coronary Angiography image.....	14
<b>2.4 Theory of windkessel of coronary artery circulation system</b> .....	15
2.4.1 Theory of windkessel.....	15
2.4.2 Circuit model of cardiovascular system.....	17
<b>2.5 Biofluid mechanics of coronary artery</b> .....	18
2.5.1 Introduction of finite element method.....	19
2.5.2 Brief introduction of Arbitrary Lagrange-Euler method.....	21
<b>2.6 Conclusion</b> .....	22
<b>Chapter 3 Segmentation of Coronary Angiography images</b> .....	23
<b>3.1 Traditional region growing algorithm</b> .....	23
3.1.1 Principle of algorithm.....	24
3.1.2 Limitations of traditional region growing algorithm.....	24
<b>3.2 Region growing algorithm based on random seeded region growing</b> .....	25
3.2.1 Seed produced automatically.....	25
3.2.2 Seed region growing.....	25
<b>3.3 Experimental result and analysis</b> .....	26
3.3.1 Miccai criteria.....	27
3.3.2 Analysis of results.....	28
<b>3.4 Conclusion</b> .....	30
<b>Chapter 4 Simulation for circuit model of coronary artery</b> .....	31

<b>4.1 Coronary artery circulation model</b> .....	31
4.1.1 Left ventricular pressure and Volume.....	33
4.1.2 Coronary artery blood pressure and blood flow.....	34
4.1.3 State equation.....	35
<b>4.2 Simulation results</b> .....	36
<b>4.3 Analysis of results</b> .....	39
<b>4.4 Software of Heart Coronary Circulation simulation</b> .....	41
4.4.1 Mild coronary artery stenosis.....	43
4.4.2 Intermediate coronary stenosis.....	43
4.4.3 Severe coronary artery stenosis.....	44
<b>4.5 Conclusion</b> .....	44
<b>Chapter 5 ALE finite element analysis of blood flow</b> .....	47
<b>5.1 Blood flow model of coronary artery</b> .....	47
5.1.1 Parameters of coronary artery blood flow model.....	48
5.1.2 Mesh of coronary artery blood flow model.....	49
5.1.3 Initial conditions, boundary conditions and calculating control.....	50
<b>5.2 Experimental and simulation results</b> .....	50
5.2.1 Analysis of the velocity distribution at different degree of stenosis.....	51
5.2.2 Analysis of the pressure at different degree of stenosis.....	53
<b>5.3 Analysis of results</b> .....	54
<b>5.4 Conclusion</b> .....	56
<b>Chapter 6 Conclusion and Prospect</b> .....	57
<b>6.1 Conclusion</b> .....	57
<b>6.2 Prospect</b> .....	58
<b>References</b> .....	61
<b>Achievements</b> .....	65
<b>Acknowledgements</b> .....	67

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的背景和意义

在人们物质生活水平的不断提高和生活结构的逐渐改变的现在,心血管疾病 (cardiovascular disease, CVD) 成为了当前最常见的疾病之一<sup>[1]</sup>。世界卫生组织把它列为了当今世界危害人类健康的三大疾病之一,每年死于心血管疾病的人数多于任何其它死因,心血管疾病成为全球的头号死因。据世界卫生组织《2010年全球非传染性疾病现状报告》统计,在2008年估计有1730万人死于心血管疾病,占全球死亡总数的30%,这些死者中,估计730万人死于冠心病,预计到2030年,死于心血管疾病(主要是心脏病和中风)的人数将增加至2330万人。高盐分、高糖分、高脂肪的饮食习惯、安静少动的生活方式和高度紧张的工作压力是导致心血管疾病发病的主要原因。动脉粥样硬化作为一种非常常见的心血管疾病,其致病的引发机制和成因等一直都是医学工程领域研究的热门课题之一。无论是心绞痛、心肌梗死还是脑卒,都是人体内血管病变发展到最终末期时候的表现,而血管病变的发展过程却是漫长的。从最开始动脉内皮功能障碍、动脉僵硬程度逐渐增加,到后来动脉壁内出现肉眼可以看见的脂质条纹,在体内炎性细胞因子的复杂作用下,脂质条纹逐渐发展成为动脉粥样斑块,最后粥样斑块造成血管狭窄甚至发生斑块破裂或者脱落导致血管腔完全闭塞引起心血管事件,整个过程大约需要十几年乃至数十年的时间,这就为早期发现亚临床心血管病变提供机会。

生物医学图像本身具有很多不可避免的缺陷和问题,通过对图像进行计算机处理可以提高图像的可读性,方便对人体的解剖结构和病变部位进行更有效的观察和诊断。医生可以通过针对冠心病的CT扫描图像提取出来的冠状动脉相关信息及计算机仿真结果,更直观看到病变位置、大小、几何形状、血流参数等信息,从而大大提高诊断的准确性和科学性。

一方面,近年大量研究工作发现<sup>[2]</sup>,动脉硬化的早期,虽然还没有明显的自觉症状,但体内血压、血管弹性和血管阻力等一系列心血管的参数已开始发生变化。如果能及时通过检查,看到这些血流参数的变化,并对血流特征进行分析,就可能在还没有自觉症状的情况下对动脉硬化这个重要的CHD潜在危险因素及

早诊断出来,从而为 CHD 的预防和治疗争取到宝贵的时间。本课题通过计算机对冠状动脉循环进行建模并采用仿真的方法进行研究<sup>[3]</sup>,观察、分析和预测冠状动脉狭窄的病患发病过程中冠状动脉血压和血流波形曲线,能够避免有创检测的并发症等问题,有助于对制定 CHD 诊断标准和治疗方案的设计等方面的参考和应用,具有重要的医学意义。

另一方面,随着这几年计算机计算能力的提高和计算数学的发展,对动脉系统的分析已经从简单的示波法进行波形分析向更加注重血管细节的数值计算方法发展<sup>[4]</sup>,如有限元法等。流体动力学将血液当作牛顿或非牛顿流体,在满足特定控制方程的条件下分析计算血管中的血管的形变、血液流动、血液和血管的相互作用等,揭示丰富的力学规律。利用数值模拟方法,在高性能电子计算机硬件及软件的辅助下,可以较为有针对性、方便地研究某些特定几何和力学因素对血流动力学的影响,进而分析复杂心血管系统的动力学特性。对血管细节部分的计算,如血管壁面切应力梯度、壁面切应力、流动分离、血液二次流等,为解释冠状动脉血流动力学因素与冠状动脉粥样硬化等动脉疾病之间的关系提供参考。

相比起传统的动物实验,以及临床实验测量方法来研究左心循环以及冠状动脉粥样硬化心脏病的情况,仿真建模具有无创、安全、直观、灵活的特点。

## 1.2 国内外研究现状

虚拟器官的建模与仿真是当前国际上生物医学工程领域研究的前沿课题。国际上从事虚拟器官研究的学者很多,已经取得的成果包括腹部主要器官的简单形态模型<sup>[5]</sup>,胃的可延展的形态模型<sup>[6]</sup>,肺的计算形态模型<sup>[7]</sup>等。国内也有专家从事这方面的研究,如清华大学白净教授关于心血管系统和循环呼吸系统的建模与仿真研究<sup>[8]</sup>,浙江大学已故的吕维雪教授关于虚拟心脏的研究<sup>[9]</sup>。厦门大学王博亮教授关于医学虚拟现实和仿真技术研究也做了大量工作,如中国人虚拟眼结构和功能模拟与建模研究<sup>[10]</sup>,数字虚拟肝脏建模与仿真方法研究<sup>[11]</sup>等,取得丰富成果<sup>[12-16]</sup>。

图像分割技术是计算机视觉和图像处理研究的一个重点,也是对心脏 MSCT 扫描图像的处理和冠状动脉提取工作的重点,一直受到研究人员关注。现在对 CT 图像分割的研究很多,也有很多算法,包括基于神经网络、模糊理论、遗传算法、小波变换等理论的图像分割方法。但由于人体解剖的个体差异较大,临床



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库