

分类号：
学号：20222108045

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于Nektar++的肝血管一维血流仿真 系统设计及应用研究

学位申请人	石帅锋
指导教师	齐全 副教授 戴昆 副教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

分类号：
学号：20222108045

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于Nektar++的肝血管一维血流仿真 系统设计及应用研究

学位申请人	石帅锋
指导教师	齐全 副教授 戴昆 副教授
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

**Design and Application Study of a One-Dimensional Blood Flow
Simulation System for Hepatic Vessels based on Nektar++**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Shi Shuai-Feng

(Computer Technology)

Dissertation Supervisor: A/Prof. Qi Quan & A/Prof. Dai Kun

June,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：石帅锋

时间： 2025 年 5 月 26 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：石帅锋

时间： 2025 年 5 月 26 日

导师签名：齐金

时间： 2025 年 5 月 26 日

摘要

介入治疗手术是治疗肝癌的重要手段，抗癌药物若不能输送至靶血管会对正常肝脏组织造成损害。可采用血流仿真技术在术前或术中基于患者肝血管模型进行血流仿真，对抗癌药物的运动状态及轨迹进行预测，进而降低肝组织损伤风险。目前主流血流仿真方法为基于三维血管几何模型的血流动力学仿真，该流程需求大量计算机算力，不能及时乃至实时地为手术医师提供血流参数支持。为解决以上问题，本研究针对一维血流仿真技术展开相关研究和应用。一维血流仿真技术主要以有限元方法为基础进行一维血流仿真数学模型的离散和数值计算，可以在保持一定精度的情况下进行快速血流仿真。本研究以 Nektar++ 有限元框架和一维血流仿真相关技术为基础，开发了一个肝血管一维血流仿真系统，主要研究内容包括：

(1) 基于血管分叉处压力损失模型的肝血管一维血流仿真求解器的设计。一维血流仿真模型对相关数学模型以及血管几何模型均进行了简化，并没有考虑血管分叉处存在的压力损失。由于肝血管存在大分叉角度的分叉形式，并且随着血管网络复杂度增加，分叉处压力的损失效应会逐渐累加，因此在肝血管一维血流仿真中需要考虑血管分叉处的压力损失。本研究以三元 Windkessel 模型为出口边界条件、血管分叉处压力损失模型为分叉边界条件、有限元计算方法为基础实现了一维血流仿真求解器。实验结果表明，本求解器相比于没有考虑分叉压力损失的一维求解器具有更高精度，并且在显著降低计算消耗的情况下与 Fluent 三维求解器仿真结果相比达到了预期效果。本研究对心动周期内仿真结果总值进行计算，发现本求解器在整个心动周期中压力与速度总值相比于 Fluent 仿真结果总值的精确度平均为 74.73% 与 84.18%。对心动周期内每个时间点的仿真结果进行计算，发现三出口与六出口肝血管模型的压力与速度仿真结果相比于 Fluent 仿真结果的平均精度分别为 64.55%、70.47%。本研究还对本求解器仿真结果中血流参数的波动特性进行分析，分析结果表明，仿真结果中速度与压力参数的波动特性符合真实物理生理规律。

(2) 肝损伤系数自动化计算方法的实现。在肝癌介入治疗手术前对肝储备功能的准确评估可以降低患者术后的肝损伤风险，而对肝体积的有效估计是进行肝储备功能评估的一种途径。本研究提出了一种肝损伤系数自动化评估算法，将肝脏某一区域血管流量与肝血管总流量之比近似表达为肝体积的占比，并将一维血流仿真结果与血管网络二叉树结构进行绑定，根据本研究实现的血管段平均流量计算算法以及一维血流仿真自动化配置算法实现了肝损伤系数的自动化计算。本研究还评估了肿瘤供血血管出口参数的变化对肝损伤系数的影响，实验结果表明，出口阻力值升高，肝损伤系数会降低，出口顺应值升高，肝损伤系数会随之增加。该实验结果对医疗工作者具有一定参考价值。

(3) 肝血管一维血流仿真系统的实现。本部分工作对前两部分工作进行整合，基于 Python 编程语言和 Nektar++、Qt 等框架设计并实现了肝血管一维血流仿真系统。本系统实现了血管网络几何信息及拓扑关系提取、一维血管网络模型构建、一维血流仿真模型构建及计算、仿真结果后处理及可视化、肝损伤系数分析等流程的自动化处理以及简单美观的前端界面，使本系统具有操作简易性，降低了医疗工作者的入手难度。本研究对该系统进行了详细测试，测试结果表明，该系统达到了预期需求，对于医疗工作者具有一定的使用价值。

关键词：一维血流仿真；Nektar++；压力损失；肝损伤分析

Abstract

Interventional surgery is an important means of treating liver cancer, and anticancer drugs that cannot be delivered to the target vessels will cause damage to normal liver tissue. Blood flow simulation technology can be used to predict the movement state and trajectory of anticancer drugs based on the patient's hepatic vascular model before or during surgery, thus reducing the risk of liver tissue damage. Currently, the mainstream blood flow simulation method is hemodynamic simulation based on three-dimensional vascular geometric model, which requires a large amount of computer arithmetic power and cannot provide timely or even real-time blood flow parameter support for surgeons. In order to solve the above problems, the present study aims at the research and application of one-dimensional blood flow simulation technology. One-dimensional blood flow simulation technology is mainly based on the finite element method for the discrete and numerical computation of the mathematical model of one-dimensional blood flow simulation, which can be used to perform fast blood flow simulation while maintaining a certain degree of accuracy. In this study, a one-dimensional blood flow simulation system for hepatic blood vessels was developed based on the Nektar++ finite element framework and techniques related to one-dimensional blood flow simulation, and the main studies include:

(1) Design of a one-dimensional blood flow simulation solver for hepatic vessels based on a pressure loss model at the vessel bifurcation. The one-dimensional blood flow simulation model simplifies the relevant mathematical model as well as the vessel geometry model, and does not consider the pressure loss at the vessel bifurcation. Since the hepatic vessels have bifurcation forms with large bifurcation angles and the effect of pressure loss at the bifurcation gradually accumulates with the increase in the complexity of the vessel network, it is necessary to take the pressure loss at the bifurcation into account in the one-dimensional blood flow simulation of the hepatic vessels. In this study, a one-dimensional blood flow simulation solver was implemented based on the 3-Windkessel model as the outlet boundary condition, the pressure loss model at the vessel bifurcation as the bifurcation boundary condition, and the finite element calculation method. The experimental results show that this solver has higher accuracy than the one-dimensional solver without considering the pressure loss at the bifurcation, and achieves the expected results compared with the Fluent three-dimensional solver simulation results with significantly reduced computational consumption. In this study, the total values of the simulation results during the cardiac cycle were calculated and it was found that the average accuracy of the total values of pressure and velocity of the present solver compared to the total values of the Fluent simulation results during the whole cardiac cycle was 74.73% and 84.18%. Calculating the simulation results for each time point during the cardiac cycle, it is found that the average accuracy of the pressure and velocity simulation results of the three-outlet and six-outlet hepatic vascular model compared to the Fluent simulation results is 64.55% and 70.47%, respectively. This study also analyzes the fluctuation characteristics of blood flow parameters in the simulation results of this solver, and the analysis results show that the fluctuation characteristics of velocity and pressure parameters in the simulation results are in accordance with the real physical and physiological laws.

(2) Implementation of automated calculation method for liver injury coefficient. Accurate assessment of liver reserve function before interventional liver cancer surgery can reduce the risk of liver injury after surgery,

and effective estimation of liver volume is one way to carry out liver reserve function assessment. In this study, an automated assessment algorithm for liver injury coefficient was proposed, in which the ratio of the vascular flow in a region of the liver to the total hepatic vascular flow was approximated to be expressed as a percentage of the liver volume, and the results of the one-dimensional blood flow simulation were bound with the binary tree structure of the vascular network, and the automated calculation of the liver injury coefficient was achieved based on the algorithm for calculating the average flow of the vascular segments as well as the algorithm for the automated configuration of the one-dimensional blood flow simulation implemented in this study. This study also evaluated the effect of changes in the outlet parameters of tumour blood supply vessels on the liver injury coefficient, the experimental results showed that the coefficient of liver injury decreases with an increase in the value of outlet resistance and increases with an increase in the value of outlet compliance. The experimental results have certain reference value for medical workers.

(3) Implementation of one-dimensional blood flow simulation system for hepatic vessels. This part of the work integrates the first two parts of the work, and designs and implements a one-dimensional blood flow simulation system for hepatic blood vessels based on Python programming language and frameworks such as Nektar++ and Qt. This system realises the automation of processes such as extraction of geometric information and topological relationship of vascular network, construction of 1D vascular network model, construction and calculation of 1D blood flow simulation model, post-processing and visualization of simulation results, and analysis of liver injury coefficient as well as a simple and beautiful user interface, which makes this system easy to operate and reduces the difficulty of medical workers to get started. In this study, the system was tested in detail, and the test results show that the system meets the expected needs and has certain value for medical workers.

Key words: One-dimensional blood flow simulation ; Nektar++; Pressure loss ; Liver injury analysis

目 录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 三维血流动力学分析研究现状	3
1.2.2 一维血流动力学分析研究现状	5
1.2.3 文献评述	7
1.3 研究内容与技术路线	8
1.3.1 研究内容	8
1.3.2 技术路线	9
1.4 本文组织结构	10
第 2 章 相关技术及理论介绍	12
2.1 数据预处理相关理论技术	12
2.2 一维血流仿真数学模型	14
2.2.1 质量守恒与动量守恒方程	14
2.2.2 压力面积关系公式	14
2.3 边界条件	15
2.3.1 入口边界条件	15
2.3.2 分叉边界条件	15
2.3.3 出口边界条件	16
2.4 数值格式	17
2.4.1 有限元方法	18
2.4.2 谱元法	18
2.4.3 Galerkin 方法	19
2.4.4 龙格-库塔方法	19

2.5 本章小结	20
第 3 章 基于压力损失模型的肝血流一维求解器设计	21
3.1 分叉压力损失模型	21
3.1.1 控制体分析	22
3.1.2 伪基准分支	24
3.1.3 子血管间的能量交换	25
3.2 损失模型植入	25
3.3 算例验证	29
3.3.1 仿真结果对比	29
3.3.2 血流的波动特性分析	34
3.4 本章小结	35
第 4 章 肝损伤系数自动化计算方法研究	36
4.1 肝损伤系数计算方法	36
4.2 自动化实现流程	39
4.2.1 一维血流仿真的自动化配置	39
4.2.2 肝损伤系数自动化计算	42
4.3 肿瘤供血血管出口参数对肝损伤系数的影响	43
4.4 本章小结	45
第 5 章 肝血管一维血流仿真系统的设计与实现	46
5.1 功能需求分析	46
5.2 系统设计	47
5.2.1 系统总体框架	47
5.2.2 系统模块设计	48
5.2.3 详细设计	49
5.3 系统实现	50
5.3.1 软硬件环境搭建	50
5.3.2 系统功能实现	50
5.3.3 系统测试	53
5.4 本章小结	54
第 6 章 结论与展望	56
6.1 结论	56
6.2 展望	57

参考文献	59
致谢	65
作者简介	66
附录	67

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

癌症在全球范围内均是高发疾病，我国是癌症患者最多的国家之一。2022年，我国大陆地区人口占世界人口总数的18.66%，但是新发癌症例数和癌症死亡例数分别占全球的24.17%和26.44%，其中肝癌在我国癌症中的死亡率仅次于肺癌^[1]。肝脏是人体内脏中最大的器官，承担着多项重要功能，包括代谢、排毒、蛋白质合成等。肝癌会造成肝功能的系统性损伤，并伴随严重的并发症。肝癌早期症状隐匿，70%至80%的患者就诊时已处肝癌中晚期，导致肝癌治疗效果差^[2]。肝癌介入治疗手术是对肝癌中晚期患者进行治疗的重要手段。随着计算机技术的发展，越来越多的研究领域开始进行与计算机技术相关的交叉研究。在肝癌介入治疗相关研究领域，计算机同样可以发挥重要作用。

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）是近代流体力学，数值数学和计算机科学结合的产物，它是将流体力学控制方程中的积分、微分项近似表示为离散的代数形式，使其成为代数方程组，然后通过计算机求解这些离散的方程组，获得离散的时间和空间点上的数值解^[3]。CFD从基本物理定理出发，具有成本低和能模拟较复杂或较理想的过程等优点，可以在科学研究和工程技术中显著减少研究成本。CFD可以直观、可视化地模拟人体血管内的血流动力学状态并进行数值量化，人体解剖学和人体流体行为的复杂性使得CFD在生物医学领域中是十分重要的工具，CFD在血流动力学评估、术后效果评价及预测等领域有非常重要的作用^[4]。通过CFD对人体的血液循环进行仿真可以获得更多有临床价值的血流动力学和生物力学信息，如流场速度、压力、壁面应力等，其中有些参数是通过其他检测方法难以获得的。

经导管动脉化疗栓塞术是肝癌介入治疗中的重要治疗方法，其原理为通过插入患者体内的导管将抗癌药物注入到肿瘤的供应血管中，使之发生栓塞，中断肿瘤获取养分的途径，最终达到肝癌治疗的目的。栓塞治疗药物十分昂贵且若治疗药物不能被输送至合适的靶血管，会对正常的肝脏部分造成损害，并造成医疗成本的额外增加。基于CFD的血流仿真可以在非侵入式测量与不需要专门的医疗仪器的情况下获取人体血流各项参数，因此可采用血流动力学技术在术前或术中对患者的肝血管进行血流仿真，对治疗药物的运动状态及轨迹进行预测，对最终的治疗效果进行评估。

如今使用CFD技术进行血流模拟大多是在三维（Three-Dimensional, 3D）尺度上进行，且已经取得了较好的结果。但是三维血流仿真存在一些局限性，比如三维血流仿真的结果很大程度上依赖于血管几何模型以及网格划分的精度，且在血管几何模型的网格

划分阶段与最终的计算阶段均需要大量计算机算力的支持，这显著提高了相关项目的研发成本，也不能给予医疗工作者及时乃至实时的血流仿真结果参考。因此可采用一维（One-Dimensional, 1D）血流动力学分析模型，基于血管几何重建和真实医学测量数据获取血管几何和结构数据，进行血管网络建模，设置一维血流动力学分析的边界条件，通过有限元等计算方法对一维血流动力学问题进行离散并使用合适的计算方案进行计算得到血流的各参数。一维血流仿真在保持一定模拟精度的同时并不需要过多计算机算力，这能显著降低计算成本且能通过术前或术中快速地血流模拟为医生进行及时地临床决策提供数据支持。其快速地仿真在未来的临床应用上能提高患者获取及时有效的治疗方案的机会，降低患者的医疗风险和医疗成本。

目前国内缺乏拥有自主知识产权的血流动力学分析软件，血流动力学分析过度依赖国外的商业软件。尽管我国的工业仿真软件正逐步崛起，但是与国外同类软件仍有较大差距。一维血流仿真系统的实现能补齐我国在血流仿真工业软件的短板，提高我国工业软件在此领域的发展水平。本研究旨在开发一个基于 Nektar++ 的肝血管一维血流仿真系统，该系统能够实现快速精确地一维血流仿真，最后通过可视化界面直观地显示出模拟结果，为医生做出医疗决策提供必要的辅助手段。

1.1.2 研究意义

一维血流仿真是一种基于血管和血流的一维简化模型进行血流动力学分析的方法，相比于三维血流仿真在保持合理精度情况下能够降低计算机算力需求。一维血流仿真可以拓展应用于其他领域，比如肺部气流的一维模拟，且能为血液或肺气道中的溶质运输模型的研发提供前置基础。随着医学研究的深入，对人体各个部分的血管系统乃至肺部的气道系统均会有更加深入地研究需求。在针对大规模人体脉管系统进行流体仿真时，三维血流仿真会需求更大规模算力，因此一维血流仿真在将来会有良好的发展前景。同时一维血流仿真结果可以作为三维血流仿真的边界条件，或可进行一维与三维的多尺度耦合仿真，该方法可实现快速仿真计算且血管网络特定区域精细仿真分析的效果。

随着医学与计算机领域的交叉研究不断发展，一维血流模型会有更广泛的应用目标。一维血流仿真可以用来研究人体循环系统的生理和病理过程，进而研究不同血管疾病的发病机制和治疗方法，例如，可以模拟冠状动脉狭窄、心肌梗死、高血压等疾病，以便更好地理解疾病的病理生理过程，并评估不同治疗方法的效果。一维血流仿真可以研究血流动力学，即如何通过血管输送血液、氧气或药物，以便更好地理解人体血液循环系统的生理过程。一维血流仿真同样可以用于优化治疗方法。例如可以模拟心脏手术、血管支架植入、药物治疗等医疗情景，以评估它们对血流动力学的影响，并找到最佳治疗方案。一维血流仿真还可以用于辅助设计医疗器械，例如血管支架、人工心脏瓣膜等，通过模拟血液在器械内的流动，可以评估器械的性能和效果，并进行优化设计。一维血流仿真对于模拟血流的波动特性也是十分有效的，且关于心脏功能、血管弹性特性和人

体重要器官的病理生理状况等有价值信息都被编码在血流的波动特性参数中。

一维血流仿真领域缺少相关的工业软件模块,该技术的实现能推动我国相关领域的发展。通过加强对一维血流仿真系统的研究,我国可以在该领域实现自主创新,避免被外国技术所束缚,保障国家的技术安全和医疗自主权。一维血流仿真的社会效益显著,可以进一步优化医疗资源,减少疾病治疗相关手术对医生的经验依赖,一维血流动力学分析的结果可以作为一种辅助手段,提高手术成功率,降低手术成本并惠及广大患者。

1.2 国内外研究现状

随着计算机相关技术的发展,CFD已广泛应用于医疗领域,已有大量血流动力学分析相关研究方法被提出。本研究将从以下两方面进行研究现状综述:(1)三维血流动力学分析研究现状;(2)一维血流动力学分析研究现状。

1.2.1 三维血流动力学分析研究现状

三维血流动力学分析是以血管的三维几何模型为计算载体进行仿真运算,在生物医学领域,该技术已成为重要工具。2000年,Zhao等人^[5]通过数值模拟方法对人颈动脉分叉中的脉动血流进行研究,对血管的壁面剪切应力、流场速度等参数进行仿真计算。2003年,LaDisa等人^[6]使用血流仿真方法对植入支架后的冠状动脉进行建模仿真,针对支架植入对冠状动脉壁剪切应力的影响进行量化分析。对血流的计算仿真有助于我们理解血管几何形态变化和血流动力学参数之间的相互作用,进而有助于达到改善基础医疗研究和患者临床护理的研究目标。血管的形状经常改变,如在心脏周期内的变形或狭窄斑块、动脉瘤的发展导致的血管变形。这些血管几何形状的变化反过来会影响血管内的血流,2019年,Gounley等人^[7]通过对心动周期中不同时间点的血管几何模型进行CFD仿真,对血管几何模型的变化与血流动力学的相互作用进行了量化。血管病变造成的血管几何结构变化同样会影响血流的流动特性,2020年,鹿晔等人^[8]提出了一种对血管病变前后的血流流场进行对比研究分析的方法,作者首先建立血管几何模型,然后将病变血管复原为发生病变前的形状,对血流流场进行数值模拟和结果对比,结果表明血管病变会对病变部位以及病变组织远心端的血流特性造成影响,且血流特性的改变会对血管的进一步病变产生重要影响。仅从医学和临床研究角度不能解释动脉血管病变发生位置的特异性,必须结合血流流动特性才能完整阐述动脉病变机理,鹿晔等人^[9]根据人体动脉医学影像,通过血流动力学仿真技术对动脉血流在血管结构与病变进程影响下的流体特性进行分析,揭示了血管病变的发生与发展机理。在血管狭窄或病变等处,血流可能显示出湍流形态,血液湍流会对血管壁造成损伤,对血液中湍流效应的准确模拟与研究可以理解湍流与血管病变之间的相互作用原理,2022年,Liao等人^[10]提出了一种并行区域分解算法,可以用于人体动脉中血流的湍流仿真。

三维血流仿真目前已广泛应用于疾病治疗研究相关领域。动脉瘤是人体内的定时炸弹，常发生于人体主要动脉，动脉瘤初次破裂造成的患者死亡率高达 30%-40%。2006 年，Acevedo-Bolton 等人^[11]使用三维血流动力学方法对人体动脉瘤处的流场进行仿真，结果表明，在复杂的患者特异性动脉瘤几何模型中，计算流体动力学的模拟结果是有效的，因此有助于动脉瘤的介入治疗的实现。动脉瘤的生长、破裂及再发等演变过程与血流动力学特性的变化密切相关，2018 年，盛斌等人^[12]通过应用血流动力学仿真的方法探讨了颅内床突旁动脉瘤栓塞前后的血流动力学特点及其对术后复发的影响。微导管塑形在动脉瘤栓塞治疗手术中是十分重要的流程，高度依赖手术医师的个人经验，2022 年，许岗勤等人^[13]在颈内动脉-后交通动脉瘤介入治疗中使用血流仿真技术获取脑血流各项参数，根据流线进行微导管塑形，该方法可以降低微导管塑形对医师经验的依赖，降低塑形难度，提高手术安全性。

心血管疾病是威胁人类健康与生命的头号杀手，而动脉粥样硬化是诸多心血管疾病的重要病因之一，2016 年，来文洋等人^[14]采用 CFD 仿真软件 STAR-CCM+ 对颈动脉分叉血管中的脉动血流进行了数值仿真，模拟了不同粘度和流量的血流在颈动脉分叉血管中的流动情况，分析研究了血液粘度和流量的改变对颈动脉粥样硬化斑块形成的影响。血流动力学因素在冠状动脉粥样硬化性心脏病的发生和发展中发挥着重要作用，2018 年，谢艳辉等人^[15]使用血流仿真技术模拟不同狭窄程度冠状动脉的血流动力学变化，探究了血流动力学参数的改变和冠状动脉血流分布与不同狭窄程度之间的联系。

大血栓的形成会阻塞血液流动进而威胁生命，血栓形成的发病机理十分复杂，形成血栓的类型取决于血管的位置和功能，2019 年，Bouchnita 等人^[16]构建了一个血栓在动脉和静脉血流中生长的多尺度模型，从数值仿真角度研究了这一过程。左心耳内血栓的形成与局部的血流参数密切相关，吴鹏等人^[17]通过血流动力学仿真分析了不同形态心耳内的血流参数特性，建立了血流参数与血栓形成的关联模型，为心耳内血栓形成的风险提供了多参数判据，作者进一步通过流固耦合数值模拟，采用血栓模型预测出心耳内血栓的形成过程。

鉴于三维血流动力学仿真需求巨量计算资源，有研究者致力于提升血流动力学算法的计算效率。2021 年，Jiang 等人^[18]提出了一种采用有限元方法和格子玻尔兹曼方法相结合的 GPU 加速流固耦合求解器，其中格子玻尔兹曼方法可以有效求解弱可压缩流体流，有限元方法用于求解固体结构变形，该求解器具有高计算效率，最终被应用于由血流引起的双叶心脏瓣膜复杂运动的仿真。Pegolotti 等人^[19]提出了基于血管模块化几何近似的血流仿真降阶模型，该方法将血管模型的近似域分解为许多子域，这些子域由直管、分叉等几何构造块参数化变形构建。在每个构造块中，作者对有限元解进行正交分解，构建出一组谱函数，然后通过谱拉格朗日乘子耦合这些局部基函数的线性组合，找到血管模型中纳维-斯托克斯方程（Navier-Stokes Equations, NS Equations）的全局解，

该方法可以在保持足够仿真精度的情况下显著降低运算复杂度。Bourantas 等人^[20]对三维血流仿真中的浸入边界方法进行改进,优化不同区域的网格密度,采用有限元方法求解不可压缩流体的 NS 方程,实验表明,该方法具有很高的精度和计算效率。2022 年,Viola 等人^[21]提出了 FSEI-GPU 模型,该模型使用统一计算设备架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)对心脏中血流-组织-电生理学相互作用的模拟仿真进行加速,实现了快速准确地人体心脏血流动力学模拟。流固耦合可以实现基于弹性血管模型的三维血流仿真,Alvarez 等人^[22]提出了一种新的流固耦合算法,该算法在微小附加算力成本的情况下考虑了血管的壁面变形。2023 年,Zacharoudiou 等人^[23]使用 CUDA C++ 构建出 GPU 版本的 HemeLB 三维血流仿真框架,该版本在进行人体血流仿真时相比于 CPU 版本框架实现了重大性能提升。

1.2.2 一维血流动力学分析研究现状

一维血流动力学仿真因其计算效率优势且仿真结果可以保持足够精度,在计算机技术发展早期便已进入到研究者的视野中。上世纪七十年代已有关于一维血流仿真的研究工作^[24-26],研究者对人体主要动脉进行一维血流仿真,研究压力和流量波在人体动脉中的传播现象。2009 年,Reymond 等人^[27]对人体主要动脉树包括心脏、脑动脉进行一维血流仿真,进行该研究的主要驱动因素是当时缺乏经过体内数据验证的一维血流仿真模型,对一维仿真结果的有效性进行定量评估方面仍存在明显不足,该研究首次使用人体压力和流量数据对完整的一维模型进行了验证,并证明了一维模型在人体血液循环中的适用性。2014 年,Xiao 等人^[28]基于人工设计的简单血管模型对一维与三维血流动力学分析结果进行对比,发现一维与三维分析结果没有显著差异,有很好的 consistency。2015 年,Mynard 等人^[29]对整个人体血液循环中的压力和流量波形进行研究,作者提出的一维模型推导的压力和流量波形再现了人体血流波形特征。综上所述,一维血流动力学技术的有效性与准确性已得到研究者验证,可采用该技术进行肝血管一维血流仿真工作。

关于一维血流仿真的研究大部分都是针对人体全身范围内主要动脉的血流仿真,对于局部特定器官动脉的一维血流仿真研究较少。2009 年,Fullana 等人^[30]提出了对腿部静脉网络进行一维仿真的模型。Willis 环是一种环状血管结构,位于大脑底部的下丘脑下方,主要功能是将富氧动脉血输送到大脑,Willis 环是大脑侧枝循环的重要组成部分,研究其血流动力学特性以及氧输运规律对脑缺血疾病的认知和预防有着重要意义,2004 年,Moore 等人^[31]研究了脑血管血流的一维和三维模型,创建了 Willis 环的一维和三维血流动力学模型。2012 年,姬长金等人^[32]利用一维血流动力学模型模拟了整个 Willis 环的流量变化和压力分布,并建立动脉内氧输运的一维模型以模拟 Willis 环内氧分压的变化规律,为研究脑组织内血液流动和氧输运贡献出基础工作。2014 年,Qureshi 等人^[33]基于结构树边界条件对人体的肺部动脉与静脉网络进行一维血流仿真,建立了一个完整的肺循环模型,模拟压力和流量波形在肺循环中的传播。2020 年,Aghilinejad 等

人^[34]使用基于能量的一维血流动力学波分析对主动脉弓硬化对传递到脑血管系统的血流脉冲波的影响进行量化,作者研究了主动脉硬度变化及其相应的波动动力学变化导致过度的脉冲能量传输到大脑的原因。

除了一维形式的 NS 方程,一维血流仿真还需要其他数学模型的支撑,不少研究者致力于研究该类数学模型以提升一维血流仿真精度。血管壁粘弹性模型是该类数学模型之一。使用一维血流仿真模型进行精确仿真的一个关键因素是血管壁的粘弹性特性描述的是否准确,2015年,Kozlov 等人^[35]对血管壁和血液的机械特性进行研究,提出了更为精细的血管壁和血液关系的数学模型。同年,Vassilevski 等人^[36]对一维血流动力学模型中血管壁粘弹性特性的各种数学模型进行了比较分析。2016年,Berntsson 等人^[37]提出了一种具有弹性壁的血管段的一维模型,血管壁由若干各向异性层组成,该模型涉及两个变量:容器壁的径向位移和压力,由两个共轭型和双曲型的耦合方程组成。2020年,Bertaglia 等人^[38]提出了一种偏微分方程形式的血管壁粘弹性模型,该模型易于扩展,适用于动脉和静脉网络,能够准确捕获流体结构的相互作用,可以用于粘弹性血管中的血流建模。

设置合适的边界条件对血流动力学分析结果的精度有显著影响,边界条件有三种,分别为入口、出口和分叉边界条件,其中出口边界条件最为重要。目前应用于一维血流仿真的出口边界条件主要为 Windkessel 模型,除此之外,Olufsen 等人^[39-41]在 2000 年提出了结构树边界条件,并在之后的研究中将结构树边界条件应用于人体动脉树的一维血流仿真,该模型表现优异。2014年,Perdikaris 等人^[42]对结构树边界条件进行改进,并将其应用于人体大型动脉网络进行一维血流仿真。2016年,Guan 等人^[43]对 Windkessel 与结构树边界条件进行对比,作者发现两种边界条件模拟的压力波和流量波在主动脉上没有显著差异,在外周动脉上的差异越来越大。作者认为在外周动脉上进行血流动力学分析应采用结构树边界条件,但是此模型相比于 Windkessel 边界条件对算力需求更高。2018年,Duanmu 等人^[44]使用集总参数模型与结构树边界条件实现了基于患者冠状动脉模型的一维血流仿真。

计算流体力学中的数值离散计算方法在一维血流仿真中也是研究重点,数值离散计算方法关乎最终求解的速度和精度,2013年,Müller 等人^[45]构造了具有不同力学性质弹性血管中的一维血流的平衡高阶数值离散方法,该方法可用于计算具有不同力学性能的血管中的一维血流。2015年,Boileau 等人^[46]对间断 Galerkin 法、局部保守 Galerkin 法、Galerkin 最小二乘有限元法、有限体积法、有限差分 MacCormack 法和简化梯形规则法等六种常用的一维血流仿真数值离散方法进行了系统比较和评估。同年,Huang 等人^[47]提出了总变差不增(Total Variation Diminishing, TVD)格式的一种扩展实现,该方法可以用于求解一维人体血液循环问题。

在一维血流仿真技术的具体应用方面,2019年,Seyed 等人^[48]构建了一个精确的