

图 4.12 某模型自然对流的速度等值线图

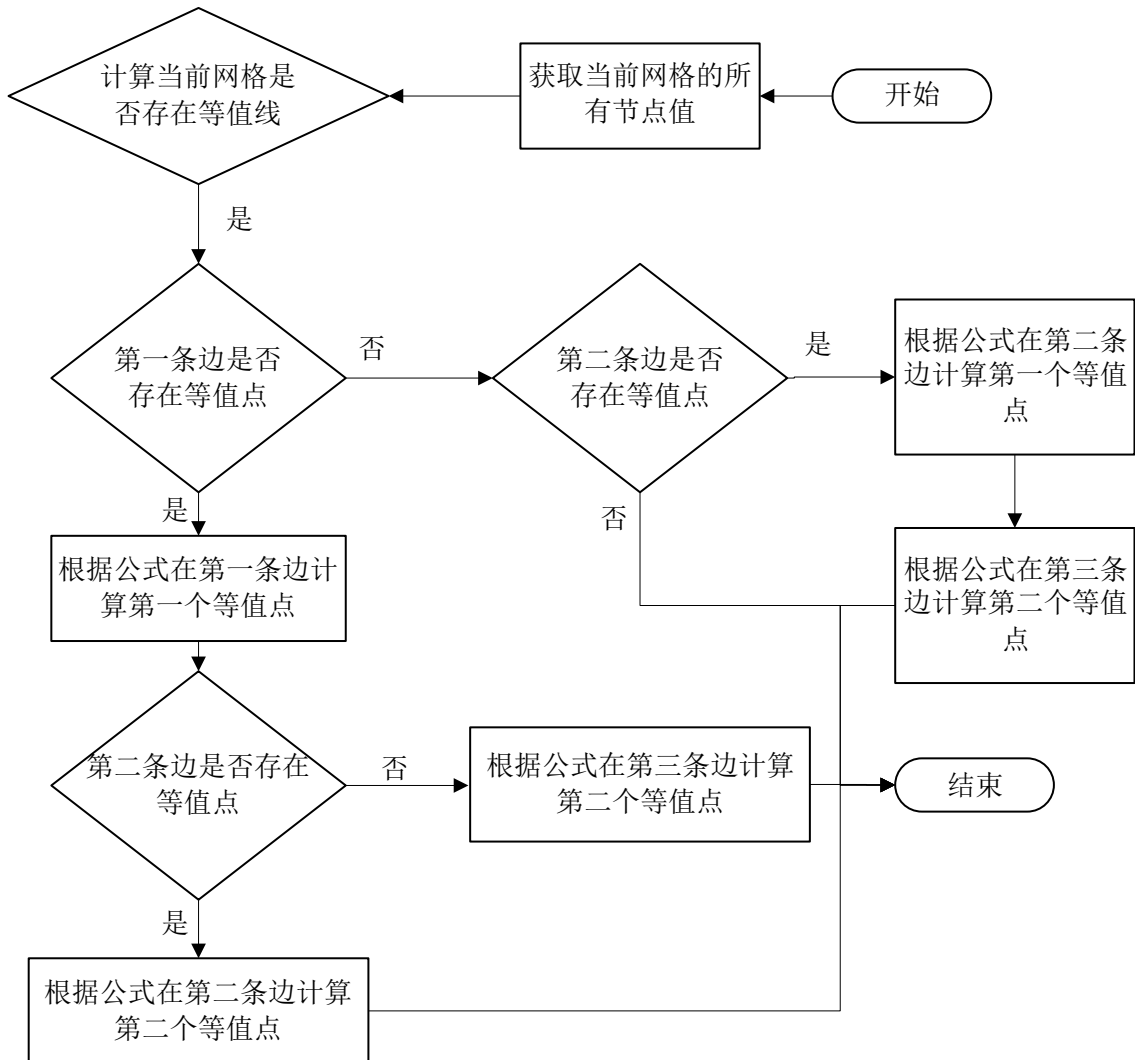


图 4.13 等值线并行算法流程图

4.6 后处理等值面图生成算法

等值面是指空间的标量场中具有相同标量值各点的集合，是由多个等值面片

组成的曲面。如果把三维模型的标量场定义为标量函数 $F(x, y, z)$ ，那么等值面就是在满足公式 $F_i = F(x, y, z)$ 的网格节点的采样值所构成的曲面，其中 F_i 为一系列常数。等值面的生成方法分为体素相交法和光线透射法。体素相交法的主要方法有 Cuberille 法^[40]、Marching Cubes 法^[41]（简称 MC 法）、Dividing Cubes 法^[42]、Marching Tetrahedra^[43]（简称 MT 法）等方法。MC 方法将三维数据场划分成规则的立方体网格，然后直接在每个立方体网格的边上计算等值面的交点，然后将这些交点组合成多边形并对其进行三角剖分，最后将剖分后的所有三角形组合起来即为等值面。由于 MC 算法处理多边形连接的情况下会出现二义性，所以 MT 算法把处理的网格改为四面体网格。在已有的三维模型网格下，将非四面体网格剖分成为四面体网格。首先遍历模型中的三维网格，然后根据所有节点的最值求出该网格是否存在等值面，倘若存在等值面，则把非四面体网格剖分成为四面体网格，一个六面体剖分成为 24 个四面体网格，一个四棱锥网格剖分成为 4 个四面体网格，一个三棱柱网格剖分成为 12 四面体网格。在上述的剖分过程中，需要对四边形面生成中心点的方式生成四个三角形，其中六面体网格和三棱柱网格需要生成体中心点。在四棱锥中，将三角形与顶点相连即可形成四个四面体网格。在六面体和三棱柱中，需要将每个四边形面上的四个三角形与体中心点连接成为四面体网格。

对于四面体网格，在进行等值面生成时根据顶点的值与等值面的值进行比较存在 16 种情况，根据对称性可以简化为五种情况，如图 4.14 所示：

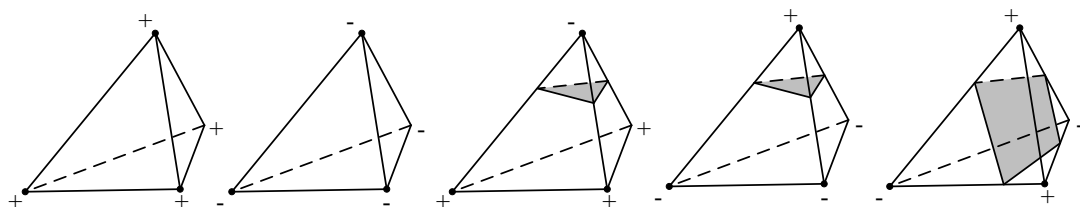


图 4.14 四面体与等值面相交示意图

如图所示，“+”号代表该点的值大于等值面的值，“-”号代表该点的值小于等值面的值。由于每个点的值与等值面的值相比都有可能出现两种情况，所以总共的情况为 $2^4=16$ 种，根据对称性可以简化为五种情况。对于四面体四个点的值都比等值面的值大或者小的情况下，该四面体不存在等值面片；对于四面体四个点有两个点比等值面大的情况下，该四面体存在等值面片且为四边形面片，由于四边形的四个点可能不在同一个平面上，所以可以将四边形剖分成为两个三角形；对于四面体有一个点比等值面大或者小的情况下，该四面体存在等值三角形面片。

上述的计算的算法利用 CPU 多线程计算，每个线程负责部分网格的计算，最后将其合并成为等值面进行渲染即可。如图 4.15 和图 4.16 所示，是一个前台

阶算例的三维模型和等密度面图：

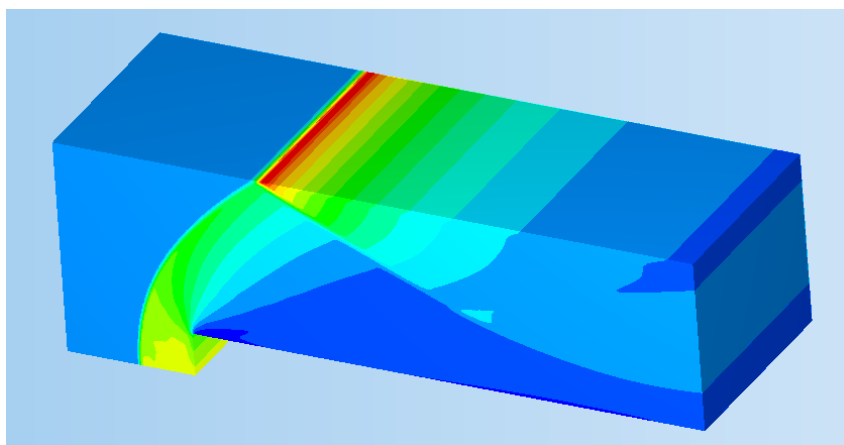


图 4.15 某前台阶算例的三维模型

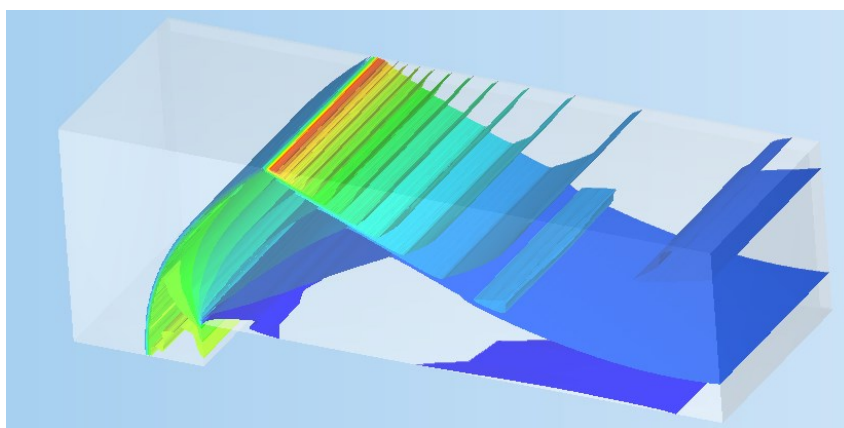


图 4.16 某前台阶算例的等密度面图

4.7 后处理动画的生成

(1) 瞬态动画：瞬态动画的生成是由每个单帧渲染组成的。在生成动画时根据设置的帧数实时读取文件，每一个文件对应一个读文件线程，读取的数据主要为位移数据以及变量数据。在读取文件后需要预处理数据，将其解析绑定到每一帧的 `vbo` 和 `vao` 中。最终动画的控制是界面通过控制定时器来定时切换到下一帧，而切换到下一帧只需要切换不同的 `vbo` 和 `vao` 进行渲染即可，渲染速度快。瞬态动画不仅支持云图动画，还支持与变形图、切面图、流线图组合形成动画。

如图 4.17 所示，左图为某模型的第一帧的动画截图、右图为该模型的最后一帧的动画截图，管道左边为入口，右边为出口，云图渲染的变量为速度的大小：

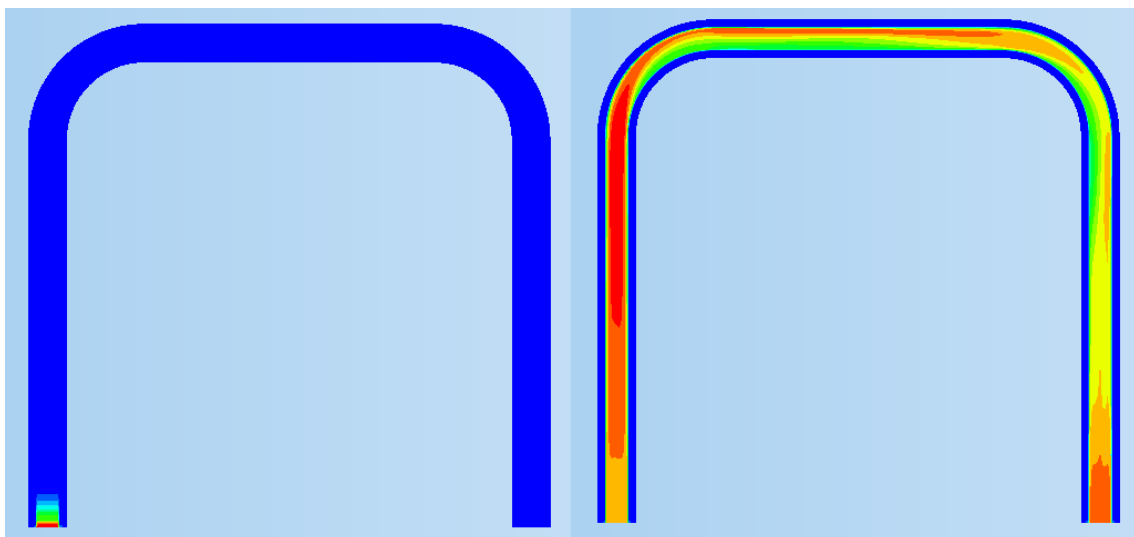


图 4.17 瞬态动画图

(2) 线性动画线性动画的生成是根据已有的云图进行数据处理后再渲染的，根据总帧数和当前云图的变形系数将变形系数从 0 到当前变形系数值进行线性变化，然后每一帧则对应一个变形系数，所以线性动画是根据变形系数的修改来生成的，并且每一帧的云图渲染的纹理值和位移值也是由帧数进行线性插值确定的。如图 4.18 所示是一个车门模型的线性动画第 20 帧（最后一帧）与第 10 帧的动画截图：

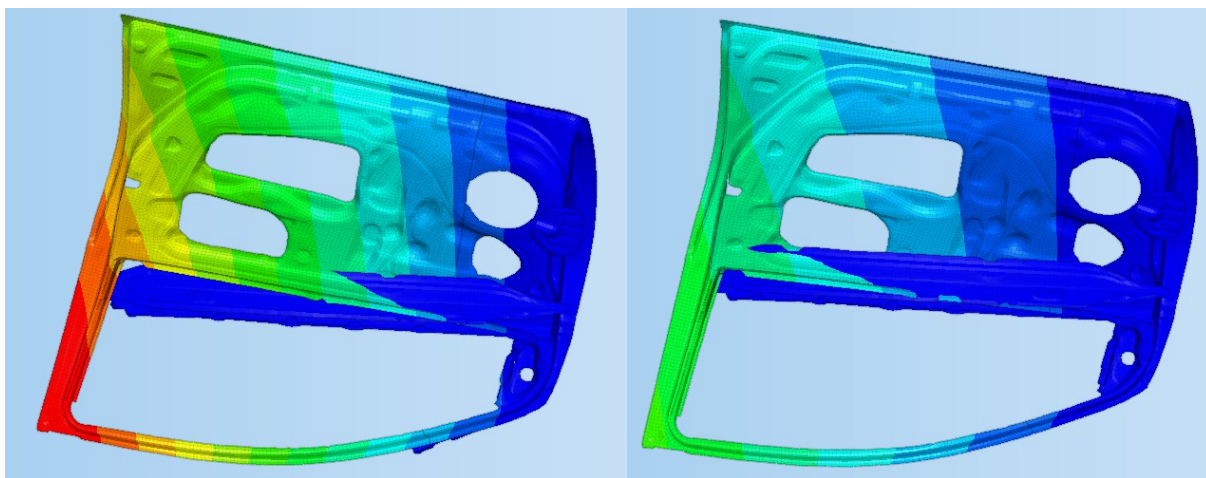


图 4.18 线性动画图

4.8 本章小结

本章主要介绍了后处理的技术研究，后处理是 CAE 分析中非常重要的环节，它对于分析结果的可视化和分析者的理解至关重要。在后处理技术研究方面，数据结构是后处理的重要基础。对于不同类型的数据，需要选择不同的数据结构来存储和处理数据，以达到更高的效率和更好的可视化效果。除了数据结构，后处理云图中颜色表的生成也是后处理技术中的一个重要方面。颜色表的生成需要考虑到分析者的直观感受和数据的特点，同时还需要根据分析任务的不同

来选择不同的颜色表。云图的生成方式也是后处理技术的一个重要研究方向。在云图的生成过程中，需要考虑到不同的离散方法对结果的影响。变形图、切面图的生成算法也是后处理技术的重要组成部分。变形图和切面图可以为分析者提供更加详细的信息，以更好地理解分析结果。在生成变形图和切面图的过程中，需要考虑到算法的精度和计算效率，以达到最优的效果。在 CFD 中常用的流线图、等值线图、等值面图的生成算法研究也是后处理技术的一个重要方向。这些图形可以为分析者提供关于流场的信息，以更好地理解和分析流场的性质。最后，动画的生成技术也是后处理技术中的一个重要方面。动画可以帮助分析者更加直观地理解分析结果，并且可以将结果以更加生动的方式展示给其他人。

总结与展望

CAE 软件是一款对产品的物理性能和制造工艺进行仿真分析和优化设计的工艺软件，随着仿真技术已经进入相对成熟的发展期，国际先进企业纷纷将仿真技术作为竞争的制胜法宝，仿真技术带来的效益越来越高，在产品创新和技术突破方面的作用也越来越大。本文在了解 CAE 软件的研究背景及意义的情况下，并处于国产 CAE 高速发展的形势下，深入研究了跨平台软件开发平台 Qt 和应用程序编程接口 OpenGL 的前提下，在 Windows 操作平台下，利用 Visual Studio 开发工具集，基于 Qt 和 OpenGL 开发了一款 CAE 软件网格渲染引擎系统。该引擎构建了一个适合所有网格模型渲染的框架，可以将几何模型和网格模型渲染在同一视图下并将其很好的结合在了一起，定义了一套高效存储的网格数据结构，支持对网格模型进行编辑以及重构的操作、定义了一套拾取相关的算法框架，还能对后处理模型进行渲染并进行数值计算出切面图、流线图、等值线图以及等值面图等。主要研究内容总结如下：

(1) 在该引擎系统中，构建了一个适合所有网格模型渲染的框架，该框架能够在此基础上使用少量代码，即对模型进行快速的渲染，支持对顶点数据的缓存进行快速修改，达到迅速更新渲染的效果。

(2) 支持对离散后的几何和网格模型进行在同一视图中进行渲染，在两者之间能够很好地进行混合渲染，切换网格和几何模型快速且方便。建立了高效存储网格数据的数据结构，支持读入 mx、inp 等文件格式的网格模型，也支持在网格编辑或者模型修改后进行快速修改数据进行渲染更新，模型整体修改包括部件隐藏、修改部件颜色、删除部件等等。其中对于导入的纯网格模型，在不存在几何模型的情况下快速计算出网格模型的内部面和外部面，仅对外部面进行渲染，使得渲染效率提高。再根据已经计算出的外部面对模型计算出边界线，使得模型的渲染更加具有立体感。

(3) 支持对几何模型实现基本的几何点、几何线、几何面、几何体的拾取，支持对网格模型实现节点、网格、单元面、边界线的拾取，在有几何模型的情况下，支持通过几何的拓扑形状对网格模型的特征进行拾取，如通过几何面拾取节点、通过几何线拾取一维网格等，还支持设置一定的角度值进而通过线角度拾取节点、通过面角度拾取二维网格等拾取方式，其中配合鼠标的左键和右键可以完成加选和减选的操作，配合键盘 Ctrl、Shift、Alt 完成单选、矩形框选、圆形框选的操作，与拾取过滤器组合起来的拾取模式高达数百种模式。

(4) 在后处理模型的渲染中，基于后处理模型基本不变的原则构建了八叉树的网格数据结构，实现了更加高效率的拾取速度，通过一维纹理的渲染实现了后

处理的云图渲染，通过透明混合渲染实现了变形前后的对比图，通过一系列相交算法实现了后处理切面图和切割图的渲染，通过数值计算方法实现了后处理流线的渲染，通过 CPU 并行的网格序列法实现了后处理的等值线的生成，通过体素相交法实现了后处理的等值面的生成，通过预处理生成缓存的形式实现了对后处理动画的流畅渲染。

本渲染引擎开发的功能涉及到了基础框架的搭建，几何、前处理、后处理的渲染等，对于千万级网格的模型是较快速的，但是对于大模型出现了运行内存过大以及框选的延时较大的问题。本渲染引擎还有许多需要改进的地方，重点着手在以下几个方面：

(1) 几何模型的渲染精度较低。在对几何模型离散的过程中，其离散精度对离散的速度影响较大，如果要保证几何模型不失真，就需要设置较高的离散精度，但是越高的离散精度离散速度越慢，本渲染引擎中没有再对离散精度低的几何模型进行曲面细分，所以导致几何模型的渲染精度较低。

(2) 网格模型的内存占用较大。本渲染引擎定义的网格数据结构大多采用容器和指针绑定的形式，考虑到获取数据的速度问题，所以在存储数据时有一些重复数据添加到了数据结构中，导致大型网格模型的内存占用较大。

(3) 网格模型的框选拾取速度较慢。在对网格模型的框选拾取中，由于要对所有在矩形框内的网格模型进行碰撞检测，在设计与计算时没有找到更加快速的检测方法，所以导致网格模型的框选拾取速度较慢。

(4) 后处理的功能较少。后处理的切面图只支持平面进行切面，并不支持其他形状的切面，如球形等；对模型进行后处理的可视化功能太少，还应该支持爆炸图等功能。

(5) 后处理的执行效率较低。在后处理的动画渲染与流线的生成过程中，即使每帧生成的时间很短，由于动画渲染的帧数过多导致整体生成的时间消耗过长；由于流线图是从起始位置由数值计算进行迭代而生成的，所以导致不能使其在每个网格之间进行并行计算，进而导致生成速度较慢。

基于以上几点以及未被发现的不足，在接下来的研究和学习中仍然需要朝着这个方向不断努力，正确开发出更好、速度更快、内存占用更小、接口更丰富的网格渲染引擎，为开发出一款优秀的国产 CAE 软件做出自己的贡献。

参考文献

- [1] 钟万勰. 发展自主 CAE 软件的战略思考[D]. , 2008.
- [2] 张曙. 工业 4.0 和智能制造[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 1-5.
- [3] Erhunmwun I D, Ikponmwosa U B. Review on finite element method[J]. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 2017, 21(5): 999-1002.
- [4] BIKER M, SIMON R. Nastran(EB/OL]. (2019-11-13) [2022-05-17]. <https://de.2xe.wiki/wiki/NASTRAN#Historie>.
- [5] 高峰. 由发展时间轴看中国 CAE 软件短板[J]. 中国工业和信息化, 2020.
- [6] Stolarski T, Nakasone Y, Yoshimoto S. Engineering analysis with ANSYS software[M]. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [7] McCullers L A. Dynamic characteristics of advanced filamentary composite structures[J]. AFFDL-TR-73-111, 1974: Vol. I-III.
- [8] Hallquist J. Recent developments in LS-DYNA[C]//Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria. 2009: 14-15.
- [9] ABAQUS. User's guide and theoretical manual[J]. 1993.
- [10] CAE 软件的差距及自主路[C]//.西南汽车信息 (2018 年 12 期 总第 393 期) . 2018:24-29.
- [11] 王彬文,段世慧,聂小华,郭瑜超.航空结构分析 CAE 软件发展现状与未来挑战[J].航空学报,2022,43(06):28-51.
- [12] Numerical methods in finite element analysis : Bathe, K J; Wilson, E L Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1976, 528p[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1978,15(2).
- [13] 张学峯, 荣鸿群, 李光权, 等. HAJIF-III 非线性结构分析通用程序系统[J]. 计算结构力学及其应用, 1988, 2.
- [14] 丁惠梁, 孙侠生, 王炜, 等. 复合材料结构分析系统 YIDOYU-Ix[J]. 航空学报, 1990, 11(12).
- [15] 张洪武, 顾元宪, 关振群, 等. 用于有限元分析与优化设计的 JIFEX 软件[J]. 计算机集成制造系统, 2003 (z1): 160-166.
- [16] 袁明武, 陈璞. 微机结构分析通用程序 SAP84 (版本 4.0)[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(3): 298-300.

- [17] 张洪武,陈飙松,李云鹏,张盛,彭海军.面向集成化 CAE 软件开发的 SiPESC 研发工作进展[J].计算机辅助工程,2011,20(02):39-49.
- [18] 国务院.新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策[J]. 2021-09-01)[2021-12-03]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-08/04/content_5532370.htm.
- [19] 安世亚太正式发布 PERA.SimCube V3.0[J].智能制造,2016(04):7.
- [20] 冯志强.自主 CAE 平台 OmtDesk 及计算软件研发新进展[C]//第十届中国 CAE 工程分析技术年会会议论文集.贵阳:中国学术期刊电子出版社.2014:203-205+227.
- [21] 唐滨,李宝君,刘辉.国产 CAE 软件研发支撑平台的设计实现与应用[J].中国力学大会论文集 (CCTAM 2019), 2019:2789-2798.
- [22] 李华君.一种基于 Qt 的应用软件开发与集成方法[J].雷达与对抗,2022,42(04):46-52+57.DOI:10.19341/j.cnki.1009-0401.2022.04.013.
- [23] 汤光泽.基于 Qt 和 VTK 的静力学有限元软件 GUI 开发[D].湖南大学,2020.
- [24] 蔡叶芳.图形处理器 3D 引擎渲染管线设计与验证[D].西安电子科技大学,2019.
- [25] 黄龙.基于 GLSL 三维渲染效果的研究与应用[D].西安科技大学,2014.
- [26] 陈晓晓.基于国产某 GPU 的实时渲染系统的设计与实现[D].华中科技大学,2019.
- [27] Meshkin H.Sort-independent alpha blending[J].GDC Session,2007.
- [28] McGuire M, Bavoil L. Weighted blended order-independent transparency [J]. Journal of Computer Graphics Techniques, 2013, 2(4).
- [29] 张良.基于 Qt 和 OpenCASCADE 的轻量级 CAD 系统开发[D].湖南大学,2021.
- [30] Bishop G, Weimer D M. Fast phong shading[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 103-106.
- [31] Tan P. Phong reflectance model[J]. Computer Vision: A Reference Guide, 2020: 1-3.
- [32] Tamminen M, Samet H. Efficient octree conversion by connectivity labeling[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1984, 18(3): 43-51.
- [33] 李梅娥,谢志毅,邢建东,等.铸件任意剖面的温度场显示[J].中国机械工程,2003,14(18): 1617-1619.
- [34] 梁振光,唐任远.电磁场有限元结果的剖切显示[J].电机与控制学报,2004,8

- (3): 242-246.
- [35] Kessenich J, Sellers G, Shreiner D. OpenGL Programming Guide: The official guide to learning OpenGL, version 4.5 with SPIR-V[M]. Addison-Wesley Professional, 2016.
- [36] Kenwright D N, Mallinson G D. A 3-d streamline tracking algorithm using dual stream functions[C]//Proceedings Visualization'92. IEEE Computer Society, 1992: 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68-62, 63, 64, 65, 66, 67, 68.
- [37] Garth C, Joy K I. Fast, memory-efficient cell location in unstructured grids for visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6): 1541-1550.
- [38] 李海生, 杨钦, 陈其明. 三维计算流体力学流场的流线构造[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(5): 434-437.
- [39] 杜小甫, 刘辉林, 刘鹤丹. 基于 CUDA 的等值线云图并行生成算法[J]. 小型微型计算机系统, 43(12): 2556-2563.
- [40] Herman G T, Liu H K. Three-dimensional display of human organs from computed tomograms[J]. Computer graphics and image processing, 1979, 9(1): 1-21.
- [41] Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm[J]. ACM siggraph computer graphics, 1987, 21(4): 163-169.
- [42] Cline H E, Lorensen W E, Ludke S, et al. Two algorithms for the three-dimensional reconstruction of tomograms[J]. Medical physics, 1988, 15(3): 320-327.
- [43] Doi A, Koide A. An efficient method of triangulating equi-valued surfaces by using tetrahedral cells[J]. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 1991, 74(1): 214-224.

致 谢

岁月静好，我们最初的梦想。在此，我要借用海子先生的这句诗，表达我对这三年研究生学习生活的感慨和感恩之情。岁月静好，这三年的研究生生活让我领略到了生命的奇妙，也让我体验到了时间的飞逝。这段时间，我有过迷茫、有过懈怠，但是我也不断奋斗，最终克服了这些困难，实现了自己的梦想。

首先，我要感谢我的导师崔向阳教授。他品德高尚、待人友善、治学严谨、学识渊博。他在我入学之前就开始指导我，到现在仍然是我学习和生活上的榜样。无论是在生活还是学习中，崔老师总是能够及时地给予我帮助和指导，让我顺利度过难关。特别是在毕业论文的指导和修改方面，崔老师给予了我无私的帮助和支持。在此，我由衷地感谢我的导师崔向阳教授。

我还要感谢冯凯、宁德业、彭凡、欧庭高、邓乾旺、何智成、刘杰等所有传授过我知识的老师们。感谢李射、胡鑫、裴泳杰、杨宏、曹兴刚、汤光泽、朱达、王海东、郭道振等师兄们，感谢他们在我的科研和生活中给予了很多的指导和帮助；感谢张登豪、王飞奇、吴屹民、冉奇、彭功成、赵翔、陈泽宇、蒙志明、张欢、曹峻、段英杰、陈杰、赵妍、谢瑞宜、沙诗琴等同门，他们在我的研究生生活中给予了很多的鼓励和帮助。感谢郑景宇、刘承志、刘振辉、闫海洋、王桂东、伍际鸿、赵金鑫、刘文广、王可囡、易灵敏等师弟师妹，他们的支持和鼓励让我更加有信心地完成论文。感谢迈曦软件的各位领导和同事们的帮助和关心。

感谢我的父母和女朋友，感谢父母一直在我成长的道路上悉心关怀和支持，感谢女朋友对我的关怀和鼓励，他们的关心和鼓励让我充满了信心和动力，让我能够更加努力地学习和生活。

感谢所有帮助和关心我的人，包括我的同学、朋友、导师和其他有关人士。他们的鼓励、支持和帮助是我走到今天的重要原因。感谢他们在我学习、生活和事业方面的支持和帮助，使我得以克服困难，取得了硕士学位。

最后，我想说，毕业只是人生的一个转折点，我们要时刻铭记感恩之心，继续努力前行，为社会和人民做出更多的贡献。