



中国矿业大学(北京)
CHINA UNIVERSITY OF MINING & TECHNOLOGY-BEIJING

硕士专业学位论文

基于 WebGL 的三维地质建模及可视化方法研究

作者: 柯峻伟

学院: 地球科学与测绘工程学院

学号: ZQT2200202053

专业学位类别: 资源与环境

专业学位领域: 地质工程

校内导师: 郝多虎

校外导师: 高劲

2025 年 6 月

批注 [yjsyl]: 论文打印方法:

- (1) 封皮: 浅蓝色皮纹纸;
(2) 页面设置: 边距上 3.0cm, 下 3.0cm, 左 3.0cm、右 3.0cm, 页眉 2.0cm, 页脚 2.0cm, A4 幅面白纸左侧装订;
(3) 打印方法: 封面、题名页、独创性声明页单面打印, 摘要之后的部分(含), 双面打印; 正文部分每一章从奇数页开始, 各章之间使用“分节符”进行分隔。摘要、Abstract、目录、图清单、表清单、主要符号表、参考文献、附录、致谢、作者简介也从奇数页开始。

批注 [yjsy2]: 日期:

- (1) 一般春季毕业生写 1 月, 夏季毕业生写 6 月, 秋季毕业生写 9 月, 具体以实际校学位会日期为准;
(2) 字体: 宋体, 数字为 Times New Roman; 字号: 三号; 对齐方式: 居中; 间距: 单倍行距, 段前段后 0 行。

中图分类号：TD263

单位代码：11413

UDC 分类号：622

密 级：公开

硕 士 专 业 学 位 论 文

中文题目：基于 WebGL 的三维地质建模及可视化方法研究

英文题目：Research on 3D Geological Modeling and Visualization
Methods Based on WebGL

作 者：柯峻伟 学 号：ZQT2200202053

专业学位类别：资源与环境 专业学位领域：地质工程

研 究 方 向：地质模型可视化 学 习 方 式：全日制

校 内 导 师：郝多虎 职 称：副教授

校 外 导 师：高劲 职 称：教授级高工

论文提交日期：2025 年 3 月 xx 日 论文答辩日期：2025 年 xx 月 xx 日

学位授予日期：2025 年 3 月 xx 日

中国矿业大学（北京）

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国矿业大学（北京）或其他教学机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名：_____日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国矿业大学（北京）有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅或借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____导师签名：_____日期：_____

摘 要

随着三维地质建模技术的快速发展，三维地质建模在数字矿山领域中的应用也更加广泛。目前矿井监测监控、地质保障和数据中控等平台均采用了基于 Web 技术的架构，但面向三维地质建模领域，缺少相适应的可视化技术及平台，因此，研究基于 Web 的三维地质建模及可视化方法具有重要意义。

论文研究了基于 WebGL 的三维地质建模及可视化方法。采用约束 Delaunay 三角剖分方法，实现复杂断层模型网格化和地层数据网格化；通过现代 Web 技术实现复杂地质模型的高效渲染、交互和分析。基于 WebGL 的三维渲染技术直接调用 GPU 进行图形绘制，确保跨平台、高效的运行性能；同时，通过扩展 Three.js 框架，实现了多种地质特征的可视化，包括由三角网格构成的地层模型和断层模型、圆柱体表示的钻孔模型以及基于 OBJ 模型导入的巷道表示。针对模型纹理的 UV 映射算法自适应问题，提出了一种包围盒、法向量结合的 UV 坐标计算方法，同时，通过模型渲染方式优化与面片倾角相似性合并提升系统性能和可视化效果。研发了基于 WebGL 的三维地质模型平台，实现地质模型可视化和地层模型可视化优化分析，并提供巷道漫游等多种交互功能，为用户提供了高效直观的操作体验。针对矿井水害防治技术需求，设计了一种基于射线与三角网格交点检测的地层层间距计算方法，该方法在实际矿区地质模型中进行了验证，其计算结果与钻孔实测数据具有良好一致性。

研究表明，基于 WebGL 的三维地质建模与可视化方法不仅具有高效的渲染能力和优越的跨平台特性，还能够灵活支持地质分析与工程设计中的多种需求分析。

关键词：WebGL；三维地质建模；可视化；纹理映射；巷道漫游

Abstract

With the rapid development of 3D geological modeling technology, the application of 3D geological modeling in the field of digital mining has become more widespread. At present, platforms for mine monitoring, geological support, and data control all adopt web-based architectures. However, in the field of 3D geological modeling, there is a lack of corresponding visualization technologies and platforms. Therefore, researching web-based 3D geological modeling and visualization methods is of great significance.

The paper investigates the three-dimensional geological modeling and visualization methods based on WebGL. Adopting the constrained Delaunay triangulation method to achieve meshing of complex fault models and geological data; Efficient rendering, interaction, and analysis of complex geological models are achieved through modern web technology. The 3D rendering technology based on WebGL directly calls GPU for graphics rendering, ensuring cross platform and efficient performance; At the same time, by extending the Three.js framework, various geological features have been visualized, including stratigraphic and fault models composed of triangular grids, drilling models represented by cylinders, and tunnel representations imported based on OBJ models. A UV coordinate calculation method combining bounding box and normal vector is proposed to address the adaptive problem of UV mapping algorithm for model texture. At the same time, the system performance and visualization effect are improved by optimizing the model rendering method and merging with the similarity of patch inclination angle. We have developed a 3D geological model platform based on WebGL, which realizes the visualization and optimization analysis of geological and stratigraphic models, and provides various interactive functions such as tunnel roaming, providing users with an efficient and intuitive operating experience. A calculation method for interlayer spacing based on ray and triangle grid intersection detection was designed to meet the technical requirements of mine water hazard prevention and control. This method was validated in an actual geological model of the mining area, and the calculated results showed good consistency with the actual drilling data.

Research has shown that 3D geological modeling and visualization methods based on WebGL not only have efficient rendering capabilities and superior cross platform characteristics, but also can flexibly support various requirements analysis in geological analysis and engineering design.

Key Words: WebGL; 3D geological modeling; visualization; texturing; tunnel navigation

批注 [yjsy3]: 奇数页页眉:

(1) Abstract 部分, 内容为“Abstract”;

(2) 字体: Times New Roman; 字号: 五号; 对齐方式: 居中; 间距: 段前、段后均为 0 行, 单倍行距。

标题“Abstract”:

字体: Times New Roman; 字号: 三号, 加粗; 对齐方式: 居中; 间距: 1.5 倍行距, 段前 12 磅, 段后 6 磅。

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 三维地质建模研究现状	2
1.2.2 三维地质可视化研究现状	3
1.3 研究内容与技术路线	4
1.3.1 研究内容	4
1.3.2 技术路线	4
1.4 创新点	5
1.5 本章小结	5
2 三维地质模型构建	7
2.1 约束 Delaunay 三角剖分方法及数据结构	7
2.1.1 遵循 Delaunay 准则的约束三角剖分	7
2.1.2 数据结构	13
2.2 钻孔模型构建	15
2.3 断层模型构建	17
2.3.1 相交断层边界计算方法	17
2.3.2 断层模型网格化	22
2.4 地层模型构建	23
2.4.1 数据源提取	23
2.4.2 地层数据网格化	24
2.5 本章小结	26
3 基于 WebGL 可视化方法	27
3.1 WebGL 可视化技术	27
3.2 构建三维可视化场景	28
3.3 地质模型纹理方法	31

批注 [yjsy4]: 奇数页页眉:

(1) 目录部分, 内容为“目录”;
(2) 字体: 楷体_GB2312; 字号: 五号; 对齐方式: 居中; 间距: 段前、段后均为 0 行, 单倍行距。

目录:

(1) 请按 word “索引目录” 标签下的“自动目录”功能设置目录, 每次打印前在目录中任何位置点右键选“更新域”“更新整个目录”来自动更新此目录; 目录从第一章开始, 前边因页眉需要设置了标题, 实际使用时更新后去掉前边部分, 即删除前边六项(独创性声明、摘要、目录、图表清单和主要符号表)即可; 每章须有本章小结;

(2) 标题“目录”: 字体: 黑体; 字号: 三号; 间距: 1.5 倍行距, 段前 12 磅, 段后 6 磅; 对齐方式: 居中;

(3) 一级标题和页码: 字体: 宋体, 字母与数字为 Times New Roman; 字号: 小四, 加粗; 对齐方式: 分散对齐; 间距: 1.5 倍行距, 段前 6 磅, 段后 0 行;

(4) 二、三级标题和页码: 字体: 宋体, 字母与数字为 Times New Roman; 字号: 小四; 对齐方式: 分散对齐; 间距: 1.5 倍行距, 段前段后均为 0 行; 缩进: 二级标题左侧缩进 2 个字符, 三级标题左侧缩进 4 个字符。

3.3.1 模型表面法向量计算与方向判断	31
3.3.2 模型包围盒计算	33
3.3.3 模型纹理 UV 计算方法	34
3.3.4 纹理分析	35
3.4 交互功能	37
3.4.1 射线追踪	37
3.4.2 模型观测	38
3.4.3 巷道漫游	39
3.5 本章小结	42
4 三维地质模型可视化系统开发	44
4.1 系统结构及功能	44
4.2 模型可视化及优化	46
4.2.1 模型可视化	46
4.2.2 地层模型可视化优化分析	50
4.2.3 基于 VUE3 系统开发方法	54
4.3 地层层间距分布计算	59
4.4 本章小结	61
5 应用实例	62
5.1 研究区概况	62
5.2 应用实例	64
5.2.1 三维地质模型	64
5.2.2 可视化应用实例	69
5.4 本章小结	77
6 结论与展望	79
参考文献	81
致 谢	91
作者简介	93

1 引言

近年来，三维地质建模与可视化技术取得了显著进展，特别是在WebGL等技术的推动下，地下空间地质结构的三维建模与可视化在工程地质学和地质信息科学中的应用不断深入。

传统的三维地质模型可视化技术通常依赖于高性能计算设备和商业软件，存在成本高、操作复杂、平台依赖性强等问题，难以满足跨平台、实时渲染和广泛共享的需求。为解决这些问题，基于B/S架构并依托于WebGL技术的三维可视化技术以其跨平台性和高效性脱颖而出。WebGL作为一种新兴技术，依赖浏览器内核直接调用GPU，实现高效的三维图形渲染。Three.js 作为其高层框架，进一步降低了开发门槛，进而实现复杂的三维场景构建、动态交互和数据可视化，为三维地质模型可视化提供了一种经济实用的技术解决方案。

1.1 研究背景及意义

随着地质勘探、工程地质和地下资源开发等领域对精细化地质模型要求的提升，传统二维地质图已难以准确、直观地表达复杂地质体的空间结构及相互关系，三维地质建模能够更加直观、准确地呈现地质构造与特征，并提供更全面、更丰富的地质信息，这对于提升地质工程设计的质量和支撑科学决策具有重要作用^[1]。

三维地质模型可视化是将地质数据抽象成三维地物，提高地质数据可读性，为地质结构的探查提供便捷。三维地质可视化系统综合运用计算机图形学、空间数据处理以及三维可视化技术，能够直观、准确地再现复杂地质体的结构特征与空间关系，实现地质数据的三维动态展示，从而帮助工程师进行设计、施工、决策。但传统的三维可视化平台，往往依赖于昂贵的硬件资源并且在便捷性和跨平台能力等方面存在一些不足。

近年来，计算机图形学的不断创新发展与三维可视化技术的日益成熟，三维模型可视化技术已成为地质学家研究热点^[2]。基于WebGL的三维地质模型可视化方法是当前地质模型可视化的热门趋势，作为一种基于浏览器的图形标准，使用户无需安装插件即可实时查看复杂的三维地质模型。相比传统的C/S（客户端和服务端）架构，基于浏览器的B/S（浏览器-服务器）架构避免了客户端安装与维护的复杂性，极大地降低了软件维护成本，用户在较为轻量的客户端设备上，也可以顺畅地加载大规模的三维地质模型，此外，还可以通过互联网实现地质信息的即时共享与交流，这在大型地质项目的协作中尤为重要^[3,4]。本研究基于

WebGL 和 B/S 架构探索三维地质模型构建与可视化方法，为地质信息 Web 三维可视化提供解决方案。

1.2 国内外研究现状

随着计算机技术的快速发展，三维地质建模及可视化技术在地质勘探、地下资源开发、工程建设等领域发挥着关键作用^[5]。然而，由于技术水平、研究重点和应用需求的不同，国内外在三维地质建模及可视化技术的研究与实践上存在一定差异。

1.2.1 三维地质建模研究现状

三维地质建模的概念最早由加拿大地质学家 Simon Houlding 在 1994 年提出，此后便受到众多地质学者的关注和研究。三维地质建模技术是三维地质建模的重要组成部分，也是实现地质信息化的关键技术^[6]，经过多年的发展，国内外学者围绕三维地质建模的具体方法、数据处理技术及系统实现等方面，开展了广泛而深入的研究。

近几十年来，国内地质学家做了丰富的三维地质模型建模方面的研究，提出或改进了很多三维地质模型。三维地质模型包括表面模型、体模型、混合模型三大类^[7]。其中面模型为表达地质体时三维空间实体表面的表示，体模型注重于模型内部的构建和整体的表示，混合模型综合了面模型和体模型的优点但实现方法更加复杂。在国内三维地质建模技术主要聚焦于结合钻孔、地质剖面 and 地震反射等多源数据的建模方法^[8]。其中基于三角网（TIN）和规则网格的建模方法引起较高的建模效率和良好的可操作性被广泛应用，具有较好的建模效率和可操作性^[9]。对于面模型，研究者广泛采用基于 Delaunay 准则的算法进行地质网格划分，基于其准则的三角网格相较于其他方法更为优良。同时，国内开发了一些具有自主知识产权的地质建模软件，例如三维地质体建模系统（3DGIS）^[10]，已在矿产资源评估和工程地质等领域中取得了一定的应用成果。然而，与国际先进技术相比，国内建模工具在大规模数据处理、用户交互设计和智能化程度方面仍显不足^[11]。

近年来，国外在三维地质建模领域取得了显著进展，研究方向涵盖数据集、算法优化和智能化建模等方面。欧美学者广泛采用隐式建模、基于有限元和有限差分的数值建模、地质统计学建模以及机器学习辅助建模等方法，以提高复杂地质构造的表达能力和计算效率。同时，开发了诸如 GOCAD、Petrel 和 Leapfrog 等成熟的地质建模软件^[12-15]，这些工具广泛应用于石油勘探、矿产资源评估与地下空间规划等领域，并集成了多种先进算法，在处理复杂地质构造和大

数据方面表现突出^[16,17]。此外，国际研究还关注建模结果的不确定性分析，结合贝叶斯推理、蒙特卡洛模拟等方法^[18]，对模型精度进行量化评估，从而提高地质预测的可靠性。这些技术的综合应用推动了三维地质建模向自动化、智能化和实时化方向发展。

1.2.2 三维地质可视化研究现状

三维可视化平台在国外研发较早，在 90 年代就开始出现了一系列比较优秀的产品，国内三维可视化技术的研究起步虽晚，但近年也涌现出很多优秀的软件。

国外比较知名的软件有：澳大利亚公司 Micromine 开发的 Micromine 地质软件，面向数字矿山具有较好的动态管理能力，涵盖了从地质查探到矿山生产的管理全过程；加拿大 Gemcom 公司的 Surpac 三维矿业软件，面向数字矿山集成了矿产预估、采集、生产等各个阶段的功能。国外三维地质模型软件虽较为成熟，但全英文界面以及昂贵的软件费用，也让其拥有了一定使用门槛。国内近年来也有很多高质量的三维建模软件涌现。例如中地数码开发的 MapGIS，是国内测绘工作者常用的 GIS 软件之一，其在地质方面推出了 MapGIS K9 工具，具有极强的三维地质建模能力；北京龙软科技有限公司推出的龙软 GIS 软件，涵盖了地测空间管理信息系统、采矿辅助设计系统、介于 WebGIS 的煤矿生产在线管理系统等，该软件在国内煤炭行业市场占有率很高。

随着图形学和计算机技术等不断发展，HTML5、WebGL 等技术受到广泛关注，国内学者开始探索将 WebGL 应用于三维地质模型可视化，基于 WebGL 的三维地质信息系统已逐步应用于在线地质展示与分析，通过实时渲染和多源数据融合，实现了地质模型的动态交互与可视化^[19,20]。与此同时，国内学者在提升可视化效率和图像质量方面也做了大量工作，例如采用基于体绘制^[21]和光线追踪的优化算法，显著改善了模型渲染的清晰度和效率。然而，国内在高性能可视化渲染、复杂场景处理和用户体验优化方面仍存在不足，尤其是 Web 端的实时交互性能还有较大提升空间^[22]。在国外在三维可视化领域起步较早，尤其是在实时渲染、虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术的融合应用方面。近年来，国外利用 WebGL 开发了诸如 Cesium 和 Three.js 等可视化框架，这些框架为地质数据的三维展示提供了强有力的技术支持，能够在轻量的硬件资源环境下实现高性能的渲染和交互^[23-26]。同时，国外研究还在探索如何结合人工智能技术，通过自动化的模型渲染和细节优化进一步提升可视化效率，展现出较为明显的技术前沿优势^[27,28]。

与传统的可视化平台相比，WebGL 技术有一些独特优势。WebGL 具有用于 Web 应用程序的图形应用程序编程接口，因此不需要额外的插件就能在浏览器中进行可视化渲染，并且仅通过 HTML 和 JavaScript 就可以实现三维渲染性能和 Flash、Silverlight 等技术相当的 Web 端可视化交互系统，并且具有良好的跨平台性，在任何具备浏览器的设备上，都可以使用相同的方式运行。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

本文基于 WebGL 技术，对三维地质模型的构建及可视化方法进行研究，具体研究内容如下：

1. 根据地质数据特点，对三维地质模型构建方法进行研究。采用约束 Delaunay 三角剖分方法，通过相交断层边界计算方法，进行复杂断层模型网格化和地层数据网格化，实现地层模型、断层模型、钻孔模型等构建。
2. 研究 WebGL 可视化技术，设计三维可视化场景构建方法；对地质模型纹理映射技术进行研究。探讨射线追踪、模型多维观察、巷道漫游等交互功能实现原理，为系统交互功能提供理论依据。
3. 设计系统的整体架构和功能模块。研究 WEB 端的地质三维可视化系统，并针对地层模型渲染以及大量数据渲染性能进行优化；实现地层间距分布计算功能以及在三维场景中的交互功能。
4. 以某矿区实际地质数据为案例，构建三维地质模型并进行可视化展示，分析系统在地质勘探、矿山开采等方面的应用价值。

1.3.2 技术路线

根据本文研究内容，可视化系统将采用如图 1.1 所示的技术路线。

1. 收集相关资料，进行三维地质建模方面的理论知识学习，并确定合适的模型网格化方法，同时对 WebGL 等可视化技术进行研究。

2. 对网格化基本数据结构进行初步设计，并进行数据整理。主要包括钻孔数据的预处理，从地质勘探数据中提取钻孔坐标、地层厚度等关键参数。

3. 基于钻孔数据，在部署好的平台环境下进行地层、断层及钻孔等三维地质模型构建方法的开发，生成并保留相应模型拓扑结构数据，为后续可视化奠定基础。

4. 查阅相关资料，研究 WebGL 可视化技术，实现基础三维场景的构建，地质模型可视化，模型纹理可视化以及场景交互功能。

5. 结合实例对可视化系统进行测试，优化系统性能及可视化渲染效果，提升系统整体的稳定性。

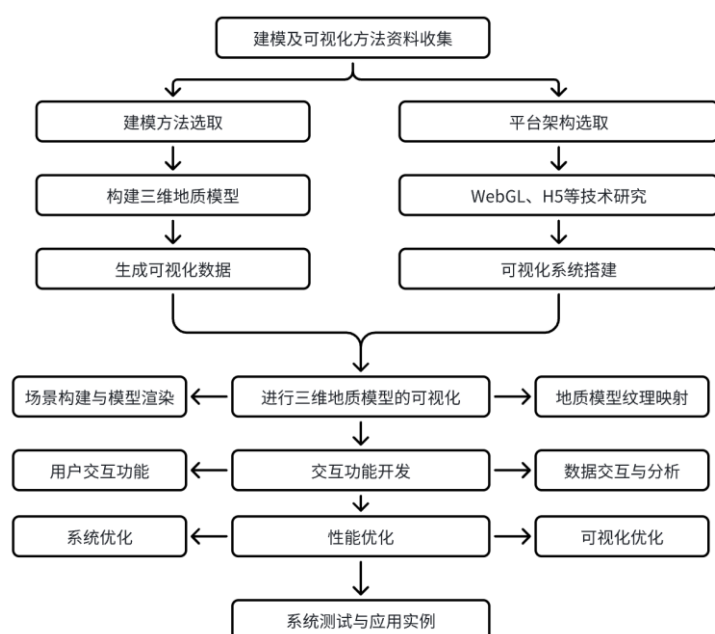


图1.1 技术路线图

Fig. 1.1 The technology roadmap

1.4 创新点

(1) 针对多类型地质模型纹理映射及 UV 坐标计算不一致问题，本文提出一种通用 UV 计算方法。通过结合包围盒计算和动态投影映射的方式，实现了一种多投影融合的 UV 计算策略。该方法通过动态计算模型表面法向量，根据地质模型不同（如地层、巷道等）的表面特性灵活选择投影平面，具有纹理映射通用性。

(2) 本文针对渲染大规模地质模型顶点数据时，浏览器内存消耗过大与效率不足的问题，对地质模型数据、材质和纹理进行统一分类管理，避免数据重复创建引起的内存浪费；采用缓冲几何体合并渲染和相似倾角合并面的方式进行可视化渲染处理，提升渲染帧率和降低内存消耗；通过模型与纹理数据的异步加载策略，

有效避免主线程阻塞，提高系统运行效率与交互响应能力。

1.5 本章小结

本章介绍了三维地质建模与三维可视化技术的研究背景以及传统建模方法在平台依赖性、实时渲染能力以及数据共享等方面存在的问题，WebGL 技术的出现结合 B/S 架构能够有效解决这些不足。随后对三维地质建模和可视化的国内外研究现状进行综述，阐述了国内外在建模方法、建模软件、渲染技术等方面的差异。最后，本章明确了研究内容与技术路线，包括钻孔数据处理、模型网格化建模、三维可视化与交互功能开发、纹理映射技术和性能优化，并提出了自适应纹理映射方法和系统渲染性能优化两大创新点。

2 三维地质模型构建

2.1 约束 Delaunay 三角剖分方法及数据结构

2.1.1 遵循 Delaunay 准则的约束三角剖分

Delaunay 三角剖分是计算几何中的经典网格生成算法，具有最大化最小角的优良特性。约束 Delaunay 三角剖分（Constrained Delaunay Triangulation, CDT）是在基本的三角剖分基础上，增加了特定的边界约束条件，使其能够更好地适应复杂地质环境中的实际需求^[29,30]。

Delaunay 准则要求在任意三角形的外接圆内，不包含除该三角形顶点外的任何其他点^[31]。基于该准则生成的三角网格具有更好的几何稳定性，它产生的三角形更接近等角，最小化狭长三角形出现的频率；同时，在满足约束条件的基础上，保留数据点集和网格拓扑信息，从而满足复杂地质结构建模的需求^[32,33]。

Peter Su 和 Robert L. Scot Drysdale^[34]确定了构建三角网格的三大类算法：分治法、扫线法和增量插入法。相比于分治法和扫线法，增量插入法具有较高的灵活性，支持动态插入点并局部调整网格。同时，该方法在随机化插入策略下的最差的期望时间下与分治法相当，但实现却更为简洁直观，不需要复杂的合并操作。此外，增量插入法能够结合 Lawson 翻转法来维护 Delaunay 性质，同时易于扩展到约束 Delaunay 三角化，适用于具有边界约束或内部障碍物的复杂区域。因此，该方法在计算效率、可扩展性和随机分布的钻孔数据实际应用中具有一定优势，本文主要选用增量插入法进行三角网格的构建。

增量插入法首先构造一个包含所有离散点集的超级三角形，再将点逐个插入现有的三角网，并通过边翻转的方式动态调整网格结构使其保持 Delaunay 性质^[35,36]。最后根据设置的约束条件，对其冲突的三角形进行移除，确保约束边完整地保留在最终网格中^[37]。

1、构造包含给定离散点集中所有点的极大三角形。利用计算机技术，可以通过三个虚拟点构建一个足够大的三角形。在剖分完成后，我们只需根据标记识别并移除包含虚拟点的非实际三角形单元，即可保留实际数据点构成的有效三角网格。初始三角形构造完成后，开始插入点集中顶点。（如图 2.1）。



图 2.1 增量插入初始化

Fig.2.1 Incremental insertion initialization

2、依次插入离散点集中的顶点，对于不符合准则的三角形进行翻转。

(1) 定位插入点所在三角形，这一过程通过半平面测试来判断目标点的位置，对于每个三角形，判断新点是否在三角形内部或者是某一边的外部。

假设三角形内部方向为逆时针，设插入点为 P ，其二维坐标为 (x_p, y_p) ，设已存在的三角形边为 AB ， A 、 B 为边的端点，进行下列数据准备：

- a. 点 P 相对向量： $\overrightarrow{AP} = (x_p - x_A, y_p - y_A)$
- b. 边 AB 的方向向量： $\overrightarrow{AB} = (x_B - x_A, y_B - y_A)$
- c. 逆时针垂直向量： $\overrightarrow{AB}^\perp = (-(y_B - y_A), x_B - x_A)$

计算目标点 P 相对于边 AB 的半平面位置公式 (2.2)。

$$h = \overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AB}^\perp = (x_p - x_A)(-(y_B - y_A)) + (y_p - y_A)(x_B - x_A) \quad (2.1)$$

展开公式可简化为：

$$h = \overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{AB}^\perp = (x_B - x_A) \cdot (y_p - y_A) - (y_B - y_A) \cdot (x_p - x_A) \quad (2.2)$$

其中：

若 $h > 0$ ，则 P 位于边 AB 的左侧（三角形内部）。

若 $h < 0$ ，则 P 位于边 AB 的右侧（三角形外部）。

若 $h = 0$ ，则 P 位于边 AB 上。

根据公式 2.3 判断顶点位置，并按以下步骤执行定位操作：

Step1 假设网格中的所有三角形都按逆时针方向排列。因此，如果一个顶点包

含在三角形中，则它将位于每个内边正方向左侧的半平面内。

Step2 对于初始化后的第一次插入，任选初始三角形的内侧之一作为起始边。对于所有后续搜索，从最近一次构建的三角形中选取起始边。

Step3 测试插入顶点是否位于起始边的左侧或左侧。如果是，则继续步骤 4。如果不是，则它将位于起始边对偶的左侧，因此转移到起始边的对偶。

Step4 重复以下步骤，直到找到包含的三角形或遍历转移到 TIN 的外部：

- i 获取前向边。如果顶点位于前向边的右侧，则转移到其对偶并继续步骤 4。
- ii 获取反向边。如果顶点位于反向边的右侧，则转移到其对偶并继续步骤 5。
- iii 如果顶点位于正向边和反向边的左侧，则它必须位于当前三角形的内部（或边上）。遍历结束。

Step5 搜索已转移到边的对偶，使得顶点位于该边的左侧。如果该边是内边，则从步骤 4 继续搜索。

Step6 如果该边是外部边，则通过移动到左或右边边缘直到找到对向边来识别对向顶点的边。

按步骤依次进行循环，直至找到包含目标点的三角形（图 2.2）。

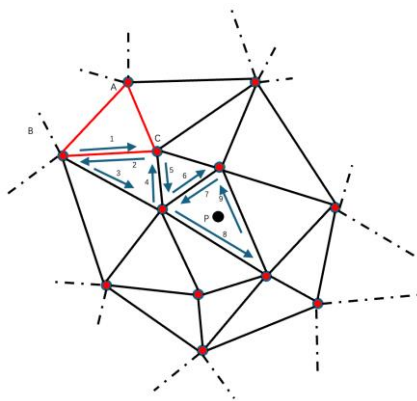


图 2.2 定位包围三角形网格局部示例

Fig. 2.2 Example of Positioning Surrounding Triangle

(2) 插入点并找到包围三角形，并利用公式 2.3 判断是否满足 Delaunay 准则，如果不满足则进行边翻转操作，保持局部的 Delaunay 性质如图 2.3 所示。

外接圆准则的数学公式：

$$\text{determinant} = \begin{vmatrix} x_A & y_A & x_A^2 + y_A^2 & 1 \\ x_B & y_B & x_B^2 + y_B^2 & 1 \\ x_C & y_C & x_C^2 + y_C^2 & 1 \\ x_P & y_P & x_P^2 + y_P^2 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.3)$$

当行列式的值大于 0 时，点 P 位于三角形 triangle ABC 的外接圆内，不满足德劳内条件，需要进行边交换。

当行列式的值小于 0 时，点 P 位于三角形 triangle ABC 的外接圆外，满足德劳内条件，不需要进行边交换，进而进行下一个三角形边的检测，直至检测回到当返回到原始的起始边时，检测完毕。

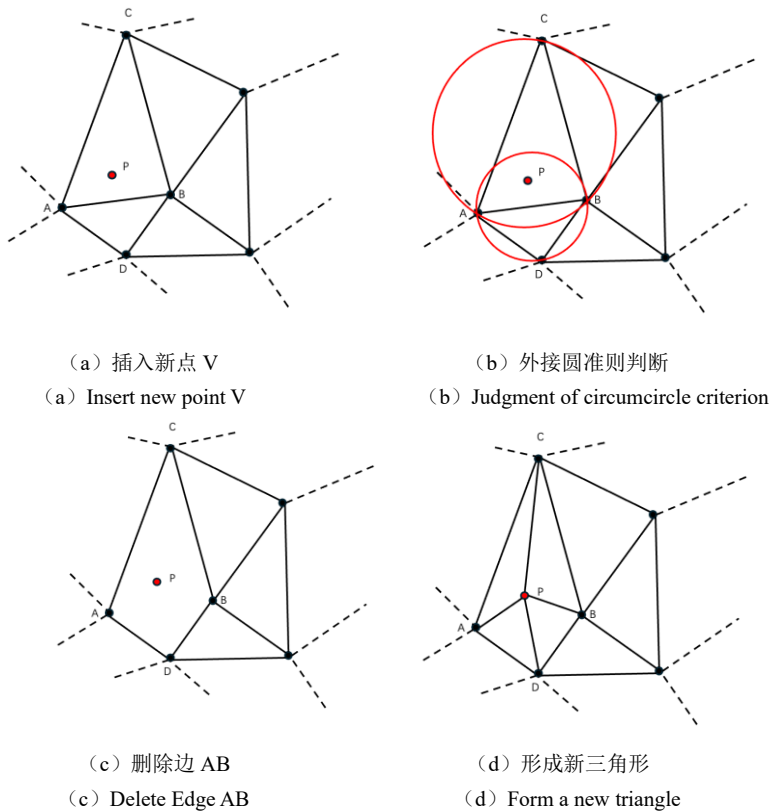


图 2.3 增量插入流程

Fig. 2.3 Incremental insertion process

对于新生成的三角形继续检测是否满足德劳内内外接圆准则，如果不满足，则继续通过翻转进行局部调整。

3、设置约束外边界和内边界（如图 2.4），检查是否与已有网格存在交叉。如果现在有三角形含括约束边则复用该边，若约束边与当前三角形产生交叉冲突，则通过边分解操作插入约束边，同时重新调整三角网结构，确保其余部分依然符合 Delaunay 准则^[38-41]，并移除外边界外、内边界内的三角形。



图 2.4 约束边界示意图

Fig. 2.4 Constraint boundary diagram

处理约束边时的步骤如下：

Step1 循环约束边进行交叉检测，如果当前约束边已经存在于构建的网格中，则直接复用，进行下一个约束边交叉检测，否则进行下一步检测。

Step2 检测相交三角形：首先找到与约束边相交的所有三角形。系识别所有与约束边交叉的边。约束边与三角形边相交检测公式：

约束边与三角形边相交时，需要进行几何计算来确定相交点。假设三角形边的端点为 $A_{(x_1, y_1)}$ 和 $B_{(x_2, y_2)}$ ，约束边的端点为 $C_{(x_3, y_3)}$ 和 $D_{(x_4, y_4)}$ 。

以边 AB 为例，由公式 2.6 确定的直线一般方程。

$$(y_2 - y_1)(x - x_1) - (x_2 - x_1)(y - y_1) = 0 \quad (2.4)$$

展开整理并联立两直线方程求解

$$(y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + (x_1 \times y_2 - y_1 \times x_2) = 0 \quad (2.5)$$

$$(y_3 - y_4)x + (x_4 - x_3)y + (x_3 \times y_4 - y_4 \times x_3) = 0 \quad (2.6)$$

用克莱姆法则求解，将方程组写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \\ y_3 - y_4 & x_4 - x_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 x_2 - x_1 y_2 \\ y_3 x_4 - x_3 y_4 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

则行列式为：

$$D = \begin{vmatrix} y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \\ y_3 - y_4 & x_4 - x_3 \end{vmatrix} = (y_1 - y_2)(x_4 - x_3) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_4) \quad (2.8)$$

分别求 x, y :

$$x = \frac{\begin{vmatrix} x_1 y_2 - y_1 x_2 & x_2 - x_1 \\ x_3 y_4 - y_3 x_4 & x_4 - x_3 \end{vmatrix}}{D}, \quad y = \frac{\begin{vmatrix} y_1 - y_2 & x_1 y_2 - y_1 x_2 \\ y_3 - y_4 & x_3 y_4 - y_3 x_4 \end{vmatrix}}{D} \quad (2.9)$$

计算上面的行列式得到相交点 (x, y) 。

$$x = \frac{(x_1 \times y_2 - y_1 \times x_2) \times (x_3 - x_4) - (x_1 - x_2) \times (x_3 \times y_4 - y_3 \times x_4)}{(x_1 - x_2) \times (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \times (x_3 - x_4)} \quad (2.10)$$

$$y = \frac{(x_1 \times y_2 - y_1 \times x_2) \times (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \times (x_3 \times y_4 - y_3 \times x_4)}{(x_1 - x_2) \times (y_3 - y_4) - (y_1 - y_2) \times (x_3 - x_4)} \quad (2.11)$$

得出交点坐标后，可通过坐标范围判断交点是否在线段上，即判断：

$$\min(x_1, x_2) \leq x \leq \max(x_1, x_2) \text{ 且 } \min(y_1, y_2) \leq y \leq \max(y_1, y_2). \quad (2.12)$$

同理，判断是否在线段 CD 上，若同时满足两个线段的条件，则说明交点位于两线段内，线段相交。

Step3 分割相交三角形，移除和约束边相交的三角形边，保证新的三角形仍然满足约束边条件。

Step4 当约束边破坏了三角网的 Delaunay 性质时，执行边翻转操作。

Step5 筛选所有约束外边界外和约束内边界内的三角形移除，保留有效网格数据。

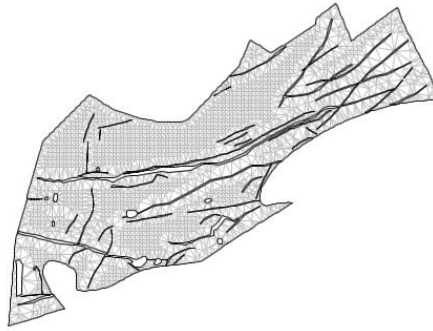


图 2.5 约束三角网格示意图

Fig. 2.5 Schematic diagram of constrained triangular mesh

2.1.2 数据结构

通过已有勘探数据二维图表中提取钻孔数据，并将其转化为 Excel 格式为后续剖分数据的基础。为提高数据处理的效率，采用了 Java 的 POI 库对 Excel 文件进行批量读取和处理，形成三角剖分所需要的基础数据格式。为更好的表述三维地质建模中的数据组织与处理，本章将介绍与三维网格生成相关的基础数据结构设计 [42,43]。

1、Point 类

Structure: Point

Attributes:

- x: double
- y: double
- z: double
- index: int

Methods:

- Constructor(x, y, z, index)
- Getters and Setters

Point 是点的表示类，x, y, z, index 这四个成员变量组成了表示点的基本属性。

2、Line 类

Structure: Line

Attributes:

- index: int
- start: Point //线段的起点
- end: Point //线段的终点
- forwardEdge: Line //前向边，即从起点到终点的边
- backwardEdge: Line //后向边，即从终点到起点的边
- opposite: Line //对偶边，即方向相反的边

Methods:

- Constructor(start, end)

说明：初始化线段的起点和终点，同时创建前向边、后向边和对偶边。

- Getters and Setters

说明：提供对 start, end, forwardEdge, backwardEdge 和 opposite 属性的访问和修改方法。

Line 类表示由两个点定义的线段，不仅包含了起点和终点的坐标，还考虑了前向边和后向边的关系。前向边是指从起点到终点的边，而后向边是指从终点到起

点的边^[44,45]。此外，还包含了对偶边属性，它代表了方向相反的边。

3、Triangle 类

Structure: Triangle

Attributes:

- index: int

- edge1: Line //边 1

- edge2: Line //边 2

- edge3: Line //边 3

Methods:

- Constructor(edge1, edge2, edge3)

说明：初始化三角形的三条边。

- Getters and Setters

说明：提供对 edge1, edge2 和 edge3 属性的访问和修改方法。

Triangle 类表示由三条边组成的一个三角形。每条边通过 Line 类来表示，从而确保三角形的几何性质能够通过边的定义进行操作和计算。

4、Mesh 类：

Structure: Mesh

Attributes:

- points: List<Point> //所有点的集合

- triangles: List<Array int [] > //三角网的索引集合

Methods:

- Constructor(points, triangles)

- Getters and Setters

Mesh 类主要存储原数据及拓扑结构信息，点集合中包含了所有点的 x、y、z 坐标信息以及 index 三角索引信息。最终通过索引号存储的三角网格拓扑结构并获取对应坐标信息，如表 2.1 所示网格拓扑结构样例数据。

表 2.1 网格拓扑结构样例数据

Table 2.1 Sample data of discrete points in a certain aquifer

Index	Point1 index	Point2 index	Point3 index
1	0	8112	2
2	4	8116	250
3	2	4	22
4	6	8094	8180
5	8	7932	412
...

2.2 钻孔模型构建

钻孔模型是三维地质建模中重要的基础组成部分，其模型的构建能够直观展现地下地质结构特征和验证网格准确性。通过处理钻孔的空间坐标数据（X, Y, Z）及其对应的地层属性，构建了适用于三维渲染的钻孔模型数据结构^[46]，如表 2.3 所示钻孔样例数据。

1、数据结构设计

每个钻孔的数据由以下信息组成：

- （1）位置坐标：钻孔的 X, Y 平面坐标，表示钻孔的地表位置。
- （2）地层分布：不同地层的 Z 坐标和厚度 h。
- （3）属性信息：地层的颜色映射关系，用于表示不同地层属性。

为方便处理与渲染，设计如下数据结构：

Structure: Borehole

Attributes:

- x: double (钻孔的 X 坐标)
- y: double (钻孔的 Y 坐标)
- layers: List<Layer> (钻孔包含的地层信息)

Structure: Layer

Attributes:

- top: double (地层顶面 Z 坐标)
- bottom: double (地层底面 Z 坐标)
- thickness: double (厚度 $h = \text{bottom} - \text{top}$)
- color: string (地层对应的颜色值)

2. 数据处理流程

钻孔数据的构建流程如下：

(1) 原始数据读取

从 Excel 或数据库中提取钻孔的 X, Y坐标及地层的坐标Z范围。以下是某一地层的钻孔样例数据如表 2.2 所示。

表 2.2 某一地层部分钻孔样例数据
Table 2.2 Sample data of drilling in a certain stratum

钻孔号	x	y	z
8304	64.14	67.80	-0.48
BD-1	91.31	100.86	-0.99
补 7	90.79	84.30	-0.83
...

(2) 计算地层厚度

对于每一层，记录当前钻孔顶板以及底板的 Z 坐标并计算厚度 h ，存储为 Layer 对象。

(3) 颜色映射

根据地层属性为每一层指定颜色，例如通过颜色表或属性映射函数。

(4) 构建钻孔模型数据

为每个钻孔创建 Borehole 对象，并将其包含的所有 Layer 对象存储到 layers 列表中。

伪代码实现：

Input: List of borehole data (x, y, z_top, z_bottom, attributes)

Output: List of Borehole objects

①初始化钻孔集合: List<Borehole> boreholes

②对于每条钻孔记录:

a. 提取钻孔坐标: x, y

b. 初始化层集合: List<Layer> layers

c. 对每一层:

i. 计算厚度: $h = z_bottom - z_top$

ii. 映射颜色: $color = \text{mapColor}(\text{attribute})$

iii. 创建 Layer 对象并添加到 layers 集合

d. 创建 Borehole 对象 (x, y, layers) 并添加到 boreholes 集合

(5) 返回所有钻孔数据: boreholes

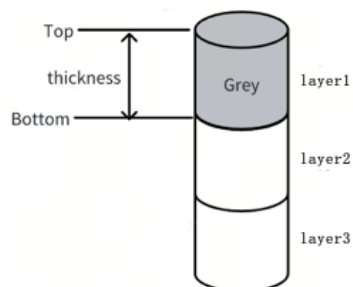


图 2.6 钻孔模型示意图

Fig. 2.6 Schematic diagram of drilling model

本小节主要讲述钻孔模型的构建流程，以钻孔坐标和地层厚度为核心的数据结构。通过上述方法，每个钻孔经处理记录了层厚、每层顶底数据，结合已有数据在可视化场景利用叠加的圆柱体分段进行渲染。

2.3 断层模型构建

2.3.1 相交断层边界计算方法

针对相交断层的情况需要进行额外处理用于网格剖分约束边界（如图），主要分为几个方面：断层相交分类、交点计算、边界数据存储。依据人为设定规则，将断层分为主要断层和辅助断层，相交情况分为十字相交型和分支相交型。

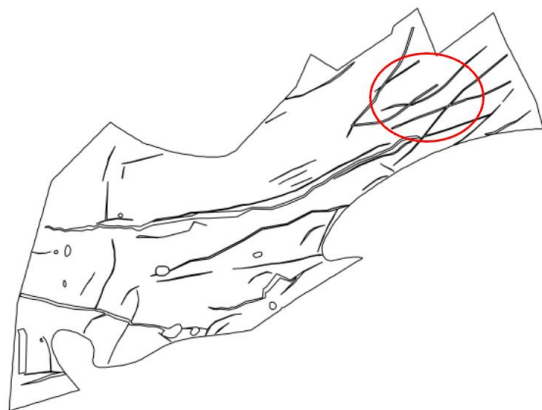


图 2.7 存在的相交断层边界

Fig. 2.7 Boundary of intersecting faults that exist

1、判断交点及交叉类型在交点计算过程中，规定按逆时针方向遍历主要断层的相邻点对，利用逐个线段求交的方式与辅助断层求交，当主辅助断层线段相交时，

可能产生多个交点，交点数量决定了断层交叉类型。图 2.7 的理论模型中蓝色点代表主要断层点，红色点代表辅助断层点。

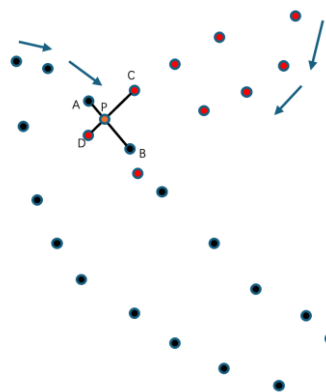


图 2.8 相交断层逐线段求交

Fig. 2.8 Intersection fault, find intersection line by line segment

根据前文已有公式 (2.11)、(2.12)、(2.13), 计算线段所在直线交点并判断交点是否在线段上, 根据断层求交情况进行分类。

(1) 两个交点、一个交点或无交点的分支型相交断层 (图 2.7)

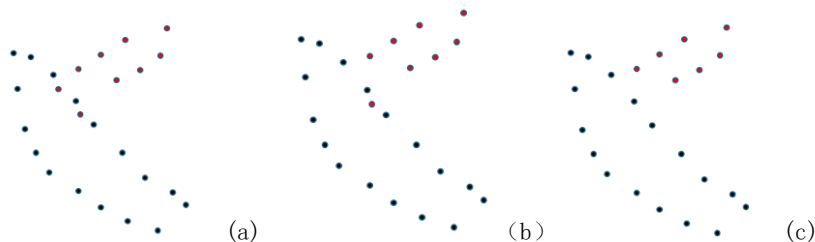


图 2.9 分支型相交断层

Fig. 2.9 Branching intersecting fault

(2) 四个交点的十字型相交断层 (图 2.11)

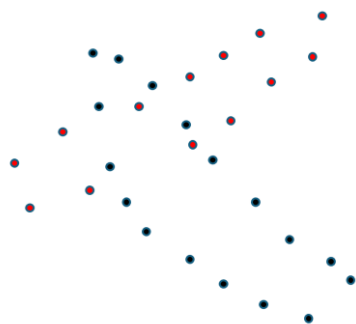


图 2.10 十字型相交断层

Fig. 2.10 Cross shaped intersecting fault

2、交点顺序区分并删除冗余数据点。对于正常求交点情况，因为是按顺时针顺序逐段求交，按照交点先后进行主次划分。但对于同一个线段求出两个交点情况，需要计算它们到其中一端点的距离，并按距离排序（图 2.12）。

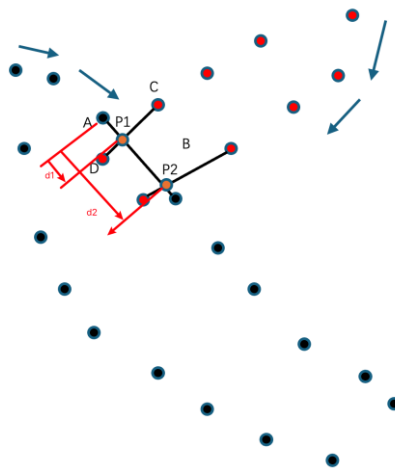


图 2.11 主次交点判断

Fig. 2.11 Determination of primary and secondary intersection points

$$d_1 = \sqrt{(x_{p1} - x_1)^2 + (y_{p1} - y_1)^2} \quad (2.13)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_{p2} - x_1)^2 + (y_{p2} - y_1)^2} \quad (2.14)$$

主交点与次交点之间存在的主断层点需删除，避免冗余数据。

（1）对于分支型情况，单个断层可能存在仅一个交点的情况，因此需要计算直线与线段交点，并取最短距离交点为有效交点并依据交点位置插入数据。

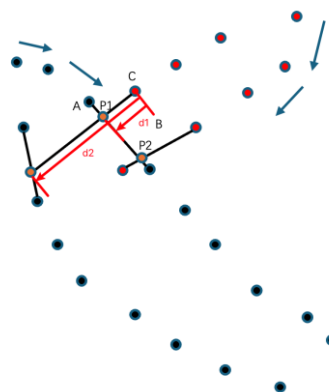


图 2.12 单交点判断

Fig. 2.12 Single intersection point judgment

(2) 无交点处理。若无交点，则计算辅断层的直线方程与主断层交点所在的直线方程求交，补充数据，获得交点后，根据最近点法则确定插入位置。

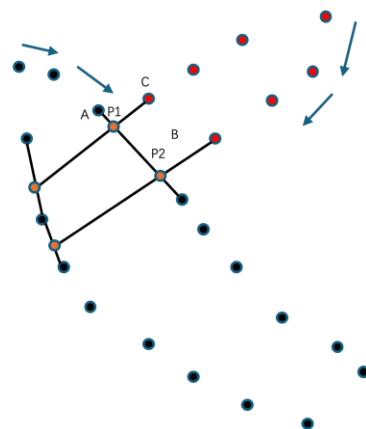


图2.13 无交点判断

Fig. 2.13 No intersection point judgment

3、数据结构及流程

计算交点后，需要对数据进行存储和排序，确保断层模型的正确性。数据结构如下：

// 定义交集集数据结构

Structure: IntersectionPoint

Attributes:


```

- coordinates: tuple (x, y) // 交点坐标
- main_fault: string // 所属主断层
- auxiliary_faults: list of string // 所属辅断层
- branch_order: list of int // 分支断层的排序方式
- counter_clockwise_order: list of int // 辅断层点的逆时针顺序
- insertion_index: int // 插入交点时的索引位置

```

// 定义主断层数据结构

Structure: MainFaultData

Attributes:

```

- fault_id: string // 断层 ID
- points: list of IntersectionPoint // 交点集合
- is_counter_clockwise: boolean // 逆时针排序标识

```

算法流程

Step1 读取主辅断层数据, 根据预设的规则进行分类存储, 遍历主断层相邻点对, 根据不同相交情况计算断层间交点。

Step2 依据交点数量分类. 四个交点的十字型和双交点、单交点、无交点的分支型。

Step3 计算主次交点并按照插入位置, 存储在对应断层逆时序离散点间。

Step4 综合所有计算结果按照主断层离散点进行逆时针的排序插入相交断层离散点数据并输出。

表 2.3 断层样例数据

Table 2.3 Fault sample data

id	x	y	z
1	36.11	57.22	0.789
2	66.57	70.73	0.815
3	42.36	27.69	0.755
4	18.14	84.64	0.766
5	93.93	41.59	0.754
...

2.3.2 断层模型网格化

断层的几何结构一般包括断层上盘和断层下盘两个部分。断层模型的建立基于这两部分的边界点集。在计算断层与地层界面交线的离散点时，主要步骤包括：

- ①根据断层的边界点集，计算对应上下盘离散点所形成的断层直线的几何方程，尖灭点处直线与相邻直线的斜率相同；
- ②根据地层结构计算断层直线与地层界面的交点；
- ③根据断层的性质计算断层上下盘边界离散点坐标，确定点集。

通过这种方法，可以计算断层与各地层的交线位置，为断层网格模型构建提供基础数据。

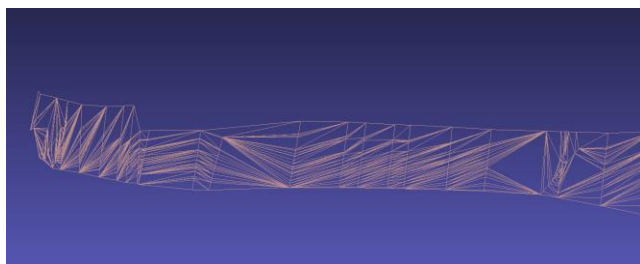
设上盘边界点集合：

$$S_u = \{P_{u1}, P_{u2}, \dots, P_{un}\}, \quad P_u = (x_u, y_u, z_u)$$

设下盘边界点集合：

$$S_d = \{P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dn}\}, \quad P_d = (x_d, y_d, z_d)$$

上盘和下盘的点集由钻孔数据获得，通过处理后得到的数据用于三角网格剖分，构建断层面的三角网格模型，输出生成的三角网格数据，用于后续断层模型可视化。



(a)



(b)

图2.14 断层网格和模型示意图

Fig. 2.14 Schematic diagram of fault model

2.4 地层模型构建

2.4.1 数据源提取

钻孔数据是进行地质建模和 WebGL 可视化数据生成的关键数据基础^[47], 主要通过从已有勘探数据资料中提取到 Excel 中, 再通过程序批量处理为剖分所需的数据结构, 程序主要采用了 Java 语言以及对 Excel 文件进行读取和解析的 POI 第三方工具库, 具体处理流程如下:

Step1 从 CAD 文件中提取钻孔数据, 提取点的空间坐标 (X, Y, Z), 并提取钻孔深度、地层属性等信息

Step2 将提取的数据写入 Excel 文件, 并定义 Excel 表格列结构: (钻孔编号, X, Y, Z, 地层属性等), 按行将数据逐一插入表格

Step3 使用 Java POI 解析 Excel 文件。读取 Excel 表格每一行的数据, 校验数据完整性, 去除空值和重复点并转化为点集合 (List<Point>)。

Step4 进行数据清洗与标准化, 确保坐标格式一致, 标记异常数据供人工检查

表 2.4 部分原始钻孔数据样例

Table 2.4 Partial Sample of Original Drilling Data

钻孔号	x	y	elevation	...	某一含水层
0810	50.094	74.52	0.877	...	-1.137
0802	46.27	69.17	0.854	...	-0.969
1601	43.40	80.51	0.834	...	-2.413
...

2.4.2 地层数据网格化

在三维地质建模中，地层数据网格化是将离散的钻孔数据转化为连续地层表面的重要步骤，地层网格数据能够直观地表示地层的空间分布特征。

基于约束 Delaunay 三角剖分方法对每个地层的钻孔数据进行网格化，剖分程序以点集合为输入，生成包含三角面索引和拓扑关系的三角网格数据，通过预先设计好基础数据结构进行数据分类存储，进一步用于地层模型的三维可视化展示^[48-51]。

剖分过程伪代码：

Input: List of points (List<Point>)

Output: Triangulated mesh (points + triangle indices)

(1) 初始化点集合：

- 从预处理后的钻孔数据中加载对应地层离散点集

(2) 执行约束 Delaunay 三角剖分：

- 初始化超级三角形
- For each point in the list:
 - a. 增量插入点到现有三角网中
 - b. 检查 Delaunay 准则:
 - If violated, perform Edge Flip 操作
- 设置约束条件，移除外边界外、内边界内三角形。

(3) 生成三角网数据：

Structure: Mesh

Attributes:

- points: List<Point> (所有点的集合)
- triangles: List<Triangle> (三角网的索引集合)

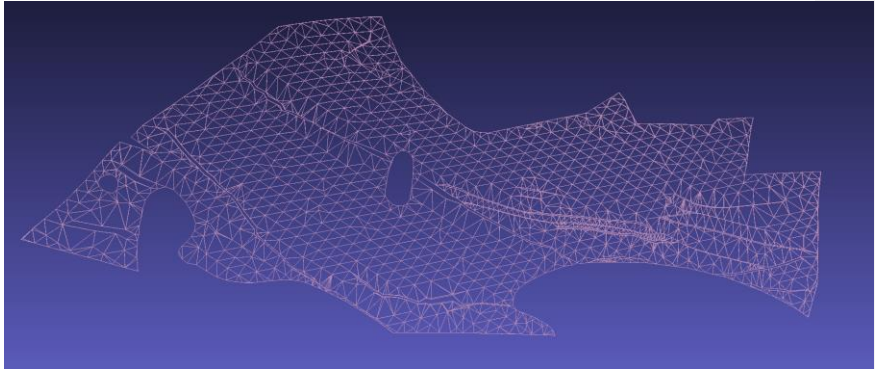
Methods:

- Constructor(points, triangles)
- Getters and Setters

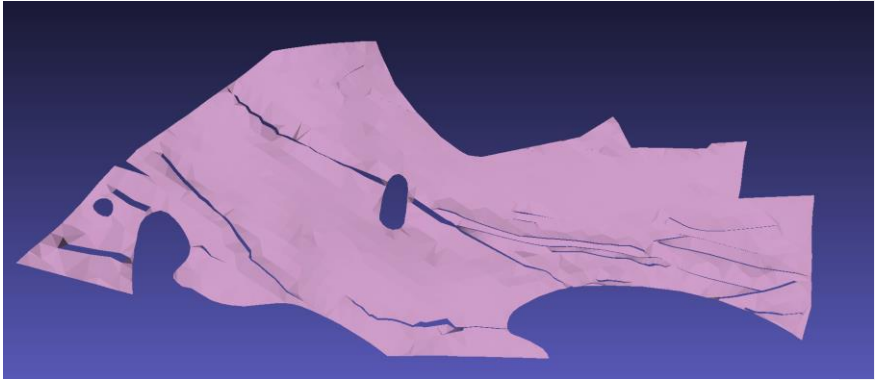
Mesh 包含以下数据：

点集合: {Point_1, Point_2, ..., Point_n},

三角面索引集合: {Triangle_1, Triangle_2, ..., Triangle_m}



(a)



(b)

图2.15 地层网格和模型示意图

Fig. 2.15 Schematic diagram of geological grid

表2.5和表2.6分别是地层网格中点数据和三角面索引数据示例。

表 2.5 地层模型网格点数据示例

Table 2.5 Example of Grid Point Data for Stratigraphic Model

index	x	y	z
0	39.858	60.176	2.557
1	38.988	60.851	2.387
2	40.0	61.0	2.407
3	40.0	62.0	1.867
...

表 2.6 地层模型网格三角面索引数据示例

Table 2.6 Example of Triangular Index Data for Stratigraphic Model Grid

index	Face Index1	Face Index2	Face Index3
0	1265	2744	1241
1	2769	853	1266
2	2768	2744	1265
3	2738	1265	1235
4	2774	1265	1271
...

2.5 本章小结

本章围绕三维地质模型的构建方法展开，介绍了从钻孔数据处理到各类模型构建的算法流程，在约束 Delaunay 三角剖分方法中如何通过增量插入和边翻转操作生成满足地质建模需求的三角网格。在数据上，设计了基础数据结构，提取并批量处理钻孔数据。在钻孔模型的构建中，通过对钻孔的空间坐标和地层属性进行分层处理，生成简洁直观的钻孔模型数据；在断层模型构建方面，通过相交情况分类，按照主断层离散点顺序进行交点计算，根据分类处理了断层间的相交关系，生成断层相交情况下的约束内边界；通过钻孔离散点集和约束边数据进行地层模型三角网格数据的生成，为后续地质模型可视化提供了数据支持。

3 基于 WebGL 可视化方法

3.1 WebGL 可视化技术

1、WebGL 技术

WebGL 是由 Khronos Group 发布的一项面向浏览器的三维图形渲染技术，通过其强大的功能，开发者可以在浏览器中绘制复杂的三维图形并实现三维场景的交互^[52,53]。WebGL 的渲染流程包括顶点着色器、片元着色器、图元装配、像素处理和绘制缓存等多个步骤，这些步骤共同完成了三维图形的高效绘制，它基于 OpenGL ES 2.0 标准，利用 JavaScript 与 GPU 直接交互，使浏览器能够调用计算机显卡进行三维渲染，从而实现复杂三维场景和模型的流畅展示。

与传统的三维图形渲染技术相比，WebGL 技术无需安装任何插件或依赖项，即可完成高效的三维渲染。同时，它具备良好的跨平台能力，能够在任何支持 WebGL 标准的浏览器上运行。此外，WebGL 技术具有较高的开放性，以开源代码形式发布。这种特性不仅降低了开发门槛，还促使了 WebGL 在学术研究、工业应用和商业开发中的广泛普及。WebGL 的便捷性、高效性和强大的功能，使其成为现代三维可视化技术的重要基础，特别是在虚拟现实、交互式数据可视化和三维建模等领域表现尤为突出^[54]。基于地质大数据的虚拟现实和增强现实技术也在逐渐被发掘^[55]，它不仅优化了图形渲染的性能，还通过无缝跨平台支持，为开发者提供了一个广阔的创新空间。其架构如图 3.1 所示。

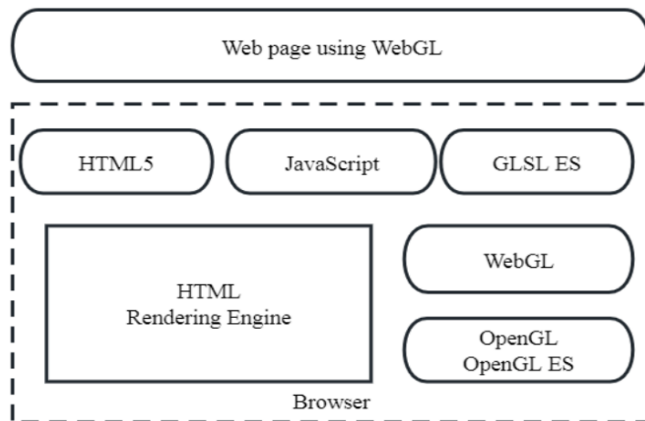


图3.1 WebGL架构图

Fig. 3.1 WebGL architecture diagram

2、Three.js 技术

Three.js 是一款基于 WebGL 的开源跨平台三维渲染库，通过对底层 WebGL 接口的高度封装，提供了更加简洁直观的 API，使得开发者可以快速构建复杂的三维场景并实现交互功能。在三维地质建模与可视化领域，Three.js 的强大功能得到了广泛应用^[56]。三维地质建模需要处理如地层、断层、矿体等复杂的三维几何结构。Three.js 可以通过自定义几何体构建地质单元模型并支持大规模数据加载与渲染。用户可以通过鼠标或触控设备实现三维场景的旋转、缩放与漫游，实时观察地质体的内部结构^[57]。此外，Three.js 的 GPU 加速渲染能力保证了其对大规模三维场景的流畅展示，即使在普通浏览器中也能高效运行^[58]。通过整合现代前端框架如 React 或 Vue，Three.js 可用于构建功能丰富的地质建模与分析平台，支持在线数据共享与协作。

在实际应用中，Three.js 常用于地质勘探、资源管理、环境模拟和灾害预测等领域^[59]。例如，通过将地质钻探数据转换为三维模型，可以直观展现地层分布和矿体形状；结合虚拟现实设备，Three.js 提供沉浸式地质场景探索体验^[60]；通过加载动态模拟数据，开发者可以实时展示地震波传播或地下水流动情况。相较传统地质可视化工具，Three.js 以其开放性、高效性和跨平台特性，为三维地质建模和可视化开辟了更多可能性。

3.2 构建三维可视化场景

在三维可视化场景的构建过程中，场景构建是通过数学模型与计算机图形学技术实现的核心任务^[61]。通过对几何图形的定义、数学变换矩阵的应用以及光照模型的计算，实现对三维模型数据到屏幕显示的映射。

1、可视化的第一步是构建基础场景集（Scene），本质上它是一个树形数据结构，作为整个可视化场景的根节点，每一个需要渲染的三维模型、灯光、相机等，都挂在对应节点下，如图 3.2 所示，每一个树节点本质上都是一个数据对象，用于组织和管理要渲染的内容。

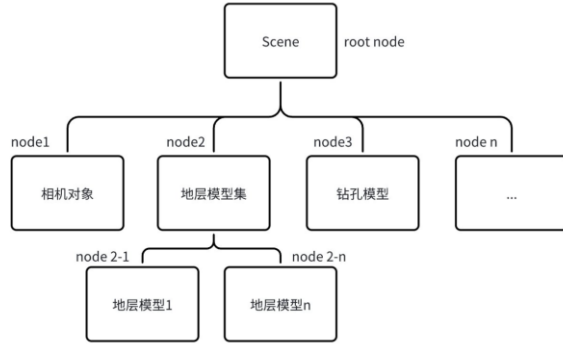


图3.2 场景树结构

Fig. 3.2 WebGL architecture diagram

2、可视化的第二步是透视相机的创建如图 3.3，透视相机主要基于投影矩阵，将三维空间点数据投影到 2D 平面上。

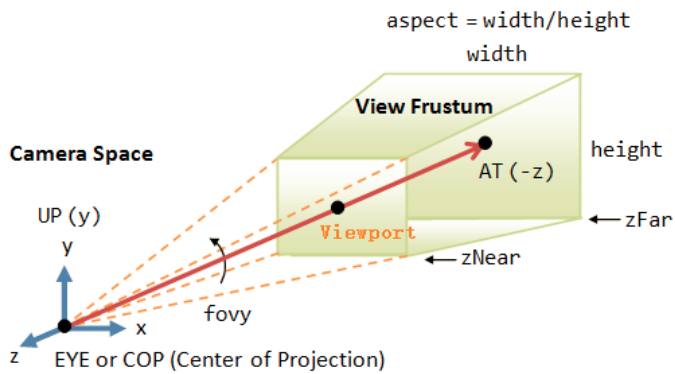


图3.3 透视相机示意图

Fig. 3.3 Schematic diagram of perspective camera

根据场视角（fov）、宽高比和远近屏幕计算投影矩阵，将视锥体映射到标准化设备坐标空间，即将数据映射到计算机屏幕正确的位置上^[62,63]。

场视角指透视投影相机的垂直视角（通常为相机镜头的角度），它决定了相机能看到的场景的大小。fov 的单位通常为弧度，用来计算投影矩阵中的缩放比例。公式 3.1 将视野角度转换为投影矩阵中垂直方向的缩放因子，保证了远近物体的大小缩放符合透视规律。

$$\text{scale}_y = \frac{1}{\tan(\frac{\text{fov}}{2})} \quad (3.1)$$

$aspect$ 是相机视口的宽高比, 这个参数调整了水平方向的投影缩放比例, 使得长宽比保持一致, 避免图像变形。公式 3.2 根据宽高比调整水平缩放, 使得横向投影不会失真。

$$aspect = \frac{\text{viewport width}}{\text{viewport height}}, \quad scale_x = \frac{1}{\tan(\frac{fov}{2}) \cdot aspect} \quad (3.2)$$

近平面定义相机离原点的最近距离, 远平面定义相机能看到的最远距离。通过这两个平面, 我们可以计算出每个点在深度方向上的投影。公式 3.3 用于计算深度的缩放因子, 使得物体距离相机近时会变大, 远时会变小; 公式 3.4 用于将深度值从齐次坐标系统映射到 $[-1, 1]$ 的标准化设备坐标系。

$$\text{depth scaling} = \frac{far+near}{near-far} \quad (3.3)$$

$$\text{depth translation} = \frac{2 \cdot far \cdot near}{near-far} \quad (3.4)$$

式中: $near, far$ 为远近裁剪平面距离。

结合公式 3.3、3.4 得相机投影矩阵公式 3.5。矩阵的第 4 行第 3 列元素通常是 -1, 用于对齐 Z 坐标轴, 这样确保了深度值在标准化设备坐标系中的正确映射。它保证了物体从前到后 (沿着 Z 轴) 的深度映射正确, 同时使得深度范围变为 -1 到 1, OpenGL 中通常使用这种深度范围, WebGL 也继承了这一范围。在顶点着色器中应用投影矩阵变换, 将变换后的顶点裁剪并映射到屏幕。

$$M_{\text{projection}} = \begin{bmatrix} scale_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & scale_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{depth scaling} & \text{depth translation} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3、光照计算是实现三维真实感渲染的关键, 也是构造可视化场景的第三步, 经典光照模型包括 Phong 模型和 Blinn-Phong 模型, Phong 模型计算简单, 适合实时渲染场景, 从性能和轻量的角度考虑, 此处主要使用 Phong 模型, 采用公式 3.6。

$$I = I_a + I_d(N \times L) + I_s(R \times V)^n \quad (3.6)$$

式中: I_a 为环境光; I_d 为漫反射; I_s 为镜面反射; N 、 L 、 V 、 R 分别为法向量、光源方向、视线方向、反射方向。

例如, 我们给模型设定的基础颜色为 RGB (0.8,0.6,0.2), 环境光 I_a 设定为 0.2, 漫反射 $I_d(N \times L)$ 计算结果为 0.7, 镜面反射 $I_s(R \times V)^n$ 计算结果为 0.5, 默认白色光源 RGB(1.0,1.0,1.0)的前提下, 最终像素颜色计算如下:

总光强度: $I=0.2+0.7=0.9=1.4$

R: $1.4 \times 0.8=1.12$ (超过 1.0 一般会被截断为 1.0)

G: $1.4 \times 0.6=0.84$

B: $1.4 \times 0.2=0.28$

最终像素颜色为 RGB (1.0, 0.84, 0.28)

计算出的 I 值会存储到帧缓冲区, 参与每一个像素大最终颜色和亮度的计算, 它直接影响模型渲染的视觉效果, 同时与材质系统和其他渲染技术紧密结合, 共同构成现代实时渲染管线。

3.3 地质模型纹理方法

进行三维地质建模时, 必须充分考虑影响地质体空间形态和岩石物理性质的各种地质因素, 以准确表达复杂的地质体分布特征^[64]。根据实地数据构建 3D 地质模型是地质研究中的一项典型任务, ^[65]通常通过使用纹理映射技术将地图、岩性图片等图像数据映射到相应的地质模型上, 以增强模型的可视化效果, 使其更接近实际地质情况。纹理映射不仅能够提高模型的细节和真实性, 还可以使研究人员更直观地理解地质结构。

在纹理映射过程中, 顶点和纹理坐标属于几何信息, 用来描述模型表面形状和如何映射纹理的基础数据^[66]; 颜色和纹理图像属于图像信息, 它们为模型表面提供了真实的视觉效果, 通常通过纹理坐标 (UV 坐标) 与几何顶点进行关联。这种结合几何和图像信息的方式, 使得 3D 地质模型不仅具备空间结构, 还能够呈现不同的地质特征, 如岩性、地层、断层等, 进一步提升其在地质分析和可视化中的应用价值。

3.3.1 模型表面法向量计算与方向判断

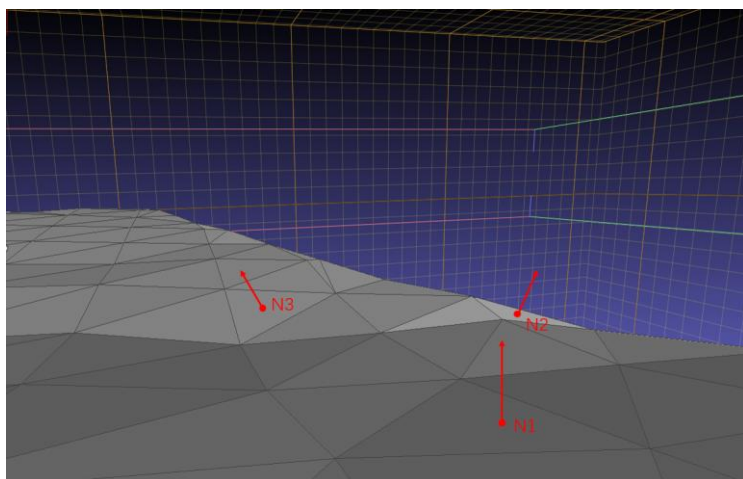
在三维地质模型的纹理 UV 计算中, 模型面片的法向量决定了模型表面的方向属性, 是选择合适投影平面进行纹理映射的前提。本文地质模型大都为三角网格结构, 需计算模型网格的三角形面片法向量 (如图 3.4 (a))。

假设顶点分别为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $P_3(x_3, y_3, z_3)$, 模型表面法向量可以通过公式 3.7 计算:

$$N = (P_2 - P_1) \times (P_3 - P_1) \quad (3.7)$$

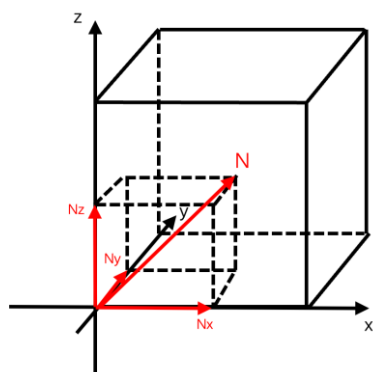
式中: $P_2 - P_1 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$; $P_3 - P_1 = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)$; \times 表示向量叉积。

图 3.4 (b) 所示，将模型表面法向量拆分为 x 、 y 、 z 三个分量，对法向量分量大小进行判断，选择合适的纹理映射平面（如 X - Y 平面、 X - Z 平面等）。



(a)模型表面法向量示意图

(a)Schematic diagram of normal vector on the surface of the model(a)



(b)模型法向量分量示意图

(b)S Schematic diagram of normal vector components in models

图3.4 法向量分量示意图

Fig. 3.4 Schematic diagram of normal vector components

根据法向量各个分量的绝对值大小，确定其主要方向。例如：

a. 若 $|N_x| > |N_y|$ 且 $|N_x| > |N_z|$ ，则 X 轴为主导方向，选择 Z - Y 平面进行映射。

b. 若 $|N_z| > |N_x|$ 且 $|N_z| > |N_y|$ ，则 Z 轴为主导方向，则选择 X-Y 平面进行映射。

c. 若 $|N_y| > |N_x|$ 且 $|N_y| > |N_z|$ ，则 Y 轴为主导方向，则选择 X-Z 平面进行映射。

投影面的选择，是为了选择更合适的包围盒平面进行投影并进一步计算 UV 坐标。

3.3.2 模型包围盒计算

包围盒计算是三维地质建模中常用的几何操作，常用于碰撞检测、网格相交等等^[67-71]，本文利用该方法确定模型坐标数据最大最小范围及纹理 UV 坐标的归一化映射。

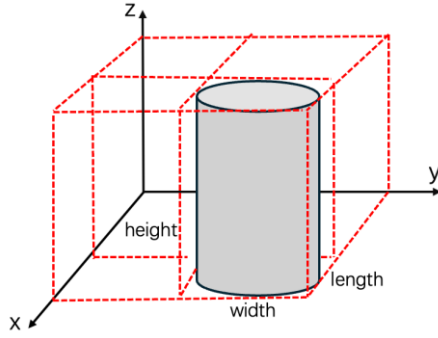


图 3.5 最小包围盒子

Fig. 3.5 Minimum bounding box

包围盒范围由从数据集中分别查找 x、y、z 三个坐标的最大值和最小值进行定义(图 3.5)。

$$\text{Bounding Box} = \{(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}), (x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})\} \quad (3.8)$$

对于单个模型顶点集合 $\{\mathbf{P}i(x_i, y_i, z_i)\} i = 1^n$ ，包围盒通过公式 (3.9)、(3.10)、(3.11) 分别对三个坐标轴分量的最大最小值进行计算定义。

$$x_{\min} = \min_{i=1}^n(x_i), x_{\max} = \max_{i=1}^n(x_i) \quad (3.9)$$

$$y_{\min} = \min_{i=1}^n(y_i), y_{\max} = \max_{i=1}^n(y_i) \quad (3.10)$$

$$z_{\min} = \min_{i=1}^n(z_i), z_{\max} = \max_{i=1}^n(z_i) \quad (3.11)$$

式中： x_i 为所有点数据的 x 坐标值； y_i 为所有点数据的 y 坐标值； z_i 为所有点数据

的 z 坐标值;

包围盒数据和模型表面法向量数据为模型纹理 UV 坐标计算奠定了数据基础。

3.3.3 模型纹理 UV 计算方法

如何真实准确地反映复杂地质体的空间属性是一个难题,大多数建模软件在系统功能和多样性方面都取得了一些进展,然而,在外观和内部质量优化方面仍存在不足^[72]。在三维地质建模及可视化中,纹理映射是提升模型真实感的关键方法之一,纹理坐标的计算直接影响纹理的准确性和渲染效果^[73]。地质模型中不规则模型表面难以直接定义 UV 映射,模型网格的几何复杂性容易导致纹理发生畸变。为解决该问题,本节结合前两节内容,提出一种自适应的纹理坐标计算方法,适用于多种地质模型的纹理映射。

通常在二维几何平面上,顶点映射到纹理空间采用公式 3.12 进行计算。

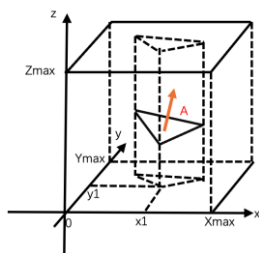
$$U = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, V = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (3.12)$$

式中: $[x_{\min}, x_{\max}]$ 和 $[y_{\min}, y_{\max}]$ 是几何图形在 x 和 y 方向上坐标的最大最小范围;
 $U, V \in [0, 1]$ 表示映射到纹理空间的坐标。

三维模型的纹理映射,按坐标空间分解为六个投影面,对于平面投影,包围盒顶底、前侧后侧、左侧右侧的投影是一致的,故分为 XY 面、XZ 面、YZ 面三个平面的投影类别。根据公式 3.7 计算模型表面法向量后,对法向量分量作出判断,进而确定映射的平面(图 3.6 (a))。以简单的三角面为例,法向量的 Z 分量大于 X 分量和 Y 分量,故选择 X-Y 平面进行投影。使用公式 3.13 计算三角面各个顶点的 UV 坐标:

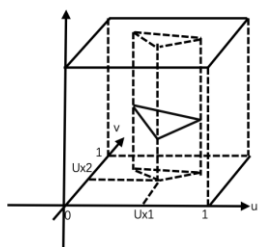
$$U = \frac{x_1 - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, V = \frac{y_1 - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (3.13)$$

如果图 3.6 (b) 所示,此时从包围盒坐标系下,转为投影平面下的二维坐标。



(a) 投影面映射

(a) Projection surface mapping



(b)三角面UV映射

(b) Triangular UV Mapping

图3.6纹理UV映射

Fig. 3.6texture UV Mapping

根据向量分量的判断结果，动态调整面片投影平面，使纹理在各个区域的拉伸最小化，并保证整体纹理分布均匀。根据每个区域的向量分量的变化，动态调整权重，确保纹理在不同区域的均匀分布并减少拉伸，最大限度地保持视觉效果的自然性。

表 3.1 UV 坐标数据样例

Table 3.1 Sample UV coordinate data

index	x	y
0	0.1543	0.9074
1	0.1523	0.9078
2	0.1540	0.9079
...

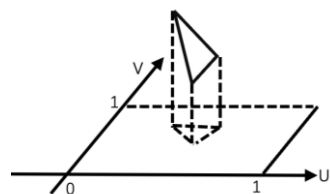
3.3.4 纹理分析

Three.js 原生 UV 映射采用预设参数化方式生成纹理坐标，对于盒状和平面几何体其 UV 坐标可表示为传统的二维平面 UV 映射，同公式 3.13，对于柱状几何体，采用了另一种基于经纬度的坐标映射方式，而对自定义网格几何体并未直接提供 UV 坐标的计算。

图 3.7 (a) 以不规则三维网格模型其中一个三角面片为例，二维投影方法固定投影平面，缺乏对几何特征的适应性，投影拉伸严重。

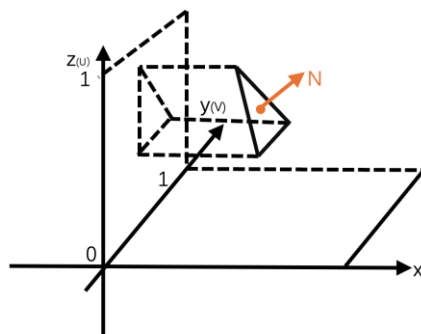
本研究方法通过动态选择投影平面来适应不同的几何形状，根据顶点法向量的分量来选择合适的投影平面。当顶点的法向量在某一维度的分量最大时，我们选择该维度为主导轴，从而动态选择投影平面。

经公式 3.7 计算后得到法向量数据进一步判断向量分量去判断投影平面(图 3.7 (b)), 如果 x 分量最大则投影至 $Y-Z$ 平面, 此时对应平面用作 UV 映射平面进行纹理坐标计算。



(a)固定投影面映射

(a)Fixed projection surface mapping



(b) 投影面动态映射

(b)Dynamic mapping of projection surface

图3.7 投影面映射示意图

Fig. 3.7 Schematic diagram of projection surface mapping

这种方法使得纹理映射能够根据物体的几何特征动态调整, 避免了固定投影面带来的过多的几何失真, 解决多朝向、复杂几何体的纹理映射问题。

在 Three.js 的原生 UV 映射机制中, 纹理坐标是通过预设参数化方式生成的, 其投影平面是静态的, 且仅支持内置的简单几何体。本研究提出的动态投影映射方法解决了三维地质模型网格纹理 UV 计算的问题, 在保证一定精度下以通用的方法计算出多种类地质模型网格的纹理 UV 坐标。

3.4 交互功能

3.4.1 射线追踪

射线追踪（Raycasting）是实现三维可视化交互功能的关键技术之一，通过在场景中投射射线与几何体进行相交计算，用户可以选择、拾取或查询三维模型的特定部分^[74]。该方法在三维地质建模的交互操作中应用广泛，如模型选择、钻孔信息查询和剖面分析等功能^[75-77]。

在三维地质建模场景中，射线追踪可用于模型选择与拾取，用户点击地质模型后，通过射线检测确定点击位置对应的模型元素，进而展现对应的模型信息。

射线追踪基本实现流程如下：

1、用户点击屏幕，通过鼠标坐标转换和相机位置生成射线。射线由摄像机位置发出，通过和鼠标点击的屏幕坐标映射到场景中的三维坐标形成方向向量，如下式所示。

$$R(t) = O + t \cdot D, t \geq 0 \quad (3.14)$$

式中： O 为射线起点， D 为单位化方向向量， t 为射线长度。

2、检测射线与场景中所有相交的几何体。

射线定义好了以后需要进行三角形相交检测，例如由三个顶点 A 、 B 、 C 组成的三角形通过公式 3.15 定义三角形中的任意顶点：

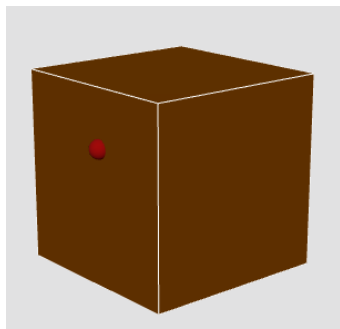
$$R(u, v) = A + u(B - A) + v(C - A) \quad (3.15)$$

式中： $u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1, t \geq 0$ 。

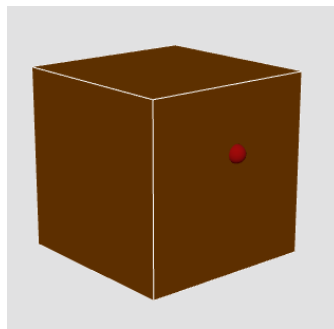
如公式 3.16 将射线方程与三角形方程联立求解，如果解满足 $t \geq 0, u \geq 0, v \geq 0, u + v \leq 1$ ，则射线与三角形相交。

$$R(t) = A + u(B - A) + v(C - A) \quad (3.16)$$

3、返回交点最近相交点或目标几何体，进行后续处理，如高亮颜色或数据查询、展示等等。



(a)



(b)

图3.8射线与模型表面产生交点

Fig. 3.8 Intersection point between ray and model surface

3.4.2 模型观测

在三维地质建模中，模型观测是交互功能的重要组成部分，用户对三维地质模型进行缩放、旋转、平移等操作，可以更好地分析地质结构、钻孔信息和巷道形态。模型观测通常有轨道控制、飞行控制、指针锁定控制等多种观测方式其中轨道控制方式操作简单直观，用户可以通过鼠标旋转、缩放和平移模型，便于快速上手，更适合地质模型的多角度精细观测，且在交互体验与性能表现上均优于其他控制方式。

轨道控制器基于球面坐标系，将相机位置表示为相对于目标点的球坐标，控制器通过修改球坐标参数来实现相机运动。我们需要定义相机位置并转换为笛卡尔坐标系，轨道控制器使用球面坐标系 (r, θ, φ) 来表示相机位置，其中：

r 是相机到目标点的距离 (radius)。

θ 是水平旋转角度 (theta)，通常在 X-Z 平面上。

φ 是垂直旋转角度 (phi)，从 Y 轴正向量起算。

相机的坐标由球面坐标到笛卡尔坐标转换公式如下。

$$x = r \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\theta) \quad (3.17)$$

$$y = r \cdot \cos(\varphi) \quad (3.18)$$

$$z = r \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) \quad (3.19)$$

利用公式 3.20 将计算出的笛卡尔坐标系结合目标点坐标，得到相机更新后到坐标。

$$camera.position = target + (x, y, z)。 \quad (3.20)$$

式中： $target$ 用户预设好的目标点坐标。

最终在系统中，用户通过鼠标设备的使用通过鼠标左侧拖动更新球面坐标参数 (θ, φ) 进行相视角的旋转操作（图 3.9(a)到(b)）。通过鼠标滚轮更新球面坐标 (r) 实现视角缩放的操作；通过鼠标右侧拖动更新目标点坐标实现视角平移操作（图 3.9(a)到(c)包含缩放、平移）。类似于地质软件中的自由观察模式，使得用户可以在三维空间中自由观测模型。

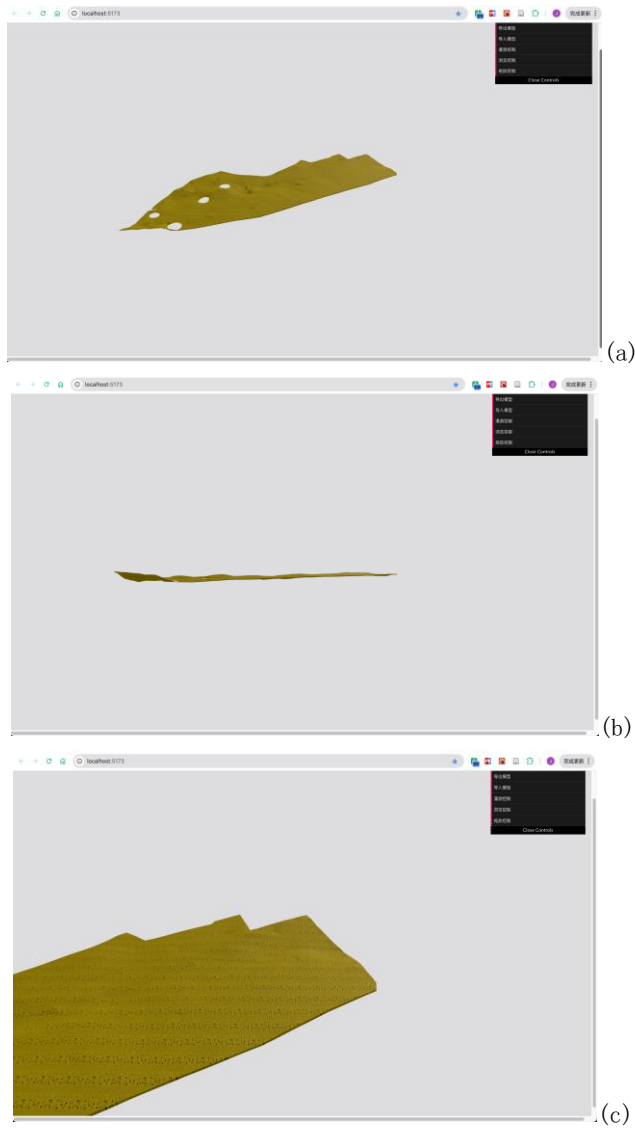


图3.9多视角观测地层模型

Fig. 3.9 Multi perspective observation model

3.4.3 巷道漫游

巷道漫游是一种虚拟现实技术，旨在通过三维可视化手段实现巷道结构的沉浸式探索与交互^[78]。主要通过实现第一人称控制器，可以高效地模拟用户在巷道

中的自由行走，全面展示巷道内部的空间布局与地质特征，像在游戏中移动视角一样，探索三维巷道。第一人称控制器的实现核心是将用户鼠标在屏幕中的输入坐标转换为相机的旋转和位移。

1、第一人称控制器通常基于欧拉角系统，依照 YXZ 顺序进行旋转，即先绕 Y 轴（偏航），再绕 X 轴（俯仰），最后绕 Z 轴（滚转）。当用户在移动鼠标时，应用公式 3.21、3.22 将鼠标移动量(Δx , Δy)转换为欧拉角增量并将角度累加 (3.23)。

$$\Delta\theta_{yaw} = -\Delta x \cdot sensitivity \quad (3.21)$$

$$\Delta\theta_{pitch} = -\Delta y \cdot sensitivity \quad (3.22)$$

$$\theta_{yaw} = \theta_{yaw} + \Delta\theta_{yaw}, \quad \theta_{pitch} = \theta_{pitch} + \Delta\theta_{pitch} \quad (3.23)$$

式中：sensitivity 是灵敏度系数，通常设置在 [0.001, 0.005]，决定了用户视角旋转的快慢；yaw (偏航) 绕 Y 轴旋转，控制视角左右转；pitch (俯仰) 绕 X 轴旋转，控制视角上下转动。

万向节锁是指在使用欧拉角表示三维旋转时，因某个角度（通常是俯仰角）接近 $\pm 90^\circ$ 度时，导致其他两个旋转轴发生重叠，从而丧失一个旋转自由度的问题。表现为相机或物体无法平滑地绕某个轴进行旋转，视角出现跳动或卡顿现象。使用欧拉角描述三维旋转，旋转轴存在先后顺序（如 Y-X-Z）。当某个角度达到特定位置时（如俯仰角 $\pm 90^\circ$ ），两个旋转轴重合，使得旋转系统退化为二维。

使用四元数表示旋转，没有旋转轴先后顺序的限制，避免了万向节锁问题。欧拉角更新后，需要应用到相机的朝向，通过四元数转换实现，公式 3.24 计算得到组合旋转的四元数并应用到相机。

$$q = q_{yaw} \cdot q_{pitch} \quad (3.24)$$

式中： q_{yaw} 是绕 Y 轴旋转的四元数 Quaternion(0,1,0, θ_{yaw})； q_{pitch} 是绕 X 轴旋转的四元数 Quaternion(0,1,0, θ_{pitch})。

四元数 (Quaternion) 是一种数学结构，扩展了复数的概念，它由四个实数构成，可以用来表示三维空间中的旋转。为防止万向节锁 (Gimbal Lock) 和不自然的视角翻转，俯仰角通常受到限制：

$$\theta_{pitch} = \text{clamp}(\theta_{pitch}, -2\pi + \epsilon, 2\pi - \epsilon) \quad (3.25)$$

式中： ϵ 是一个小值，防止达到正负 90° 度时的奇异性。

通过上述计算，用户可以通过鼠标移动控制相机的视角旋转。

2、第一人称视角的位移通常通过用户键盘的输入给定相机前向方向向量。

给定相机的前向方向向量 f_x ，可以计算出平面上的移动方向：

$$f_{planar} = \text{normalize}(f_x, 0, f_z) \quad (3.26)$$

右向量通过旋转前向向量 90° 度得到：

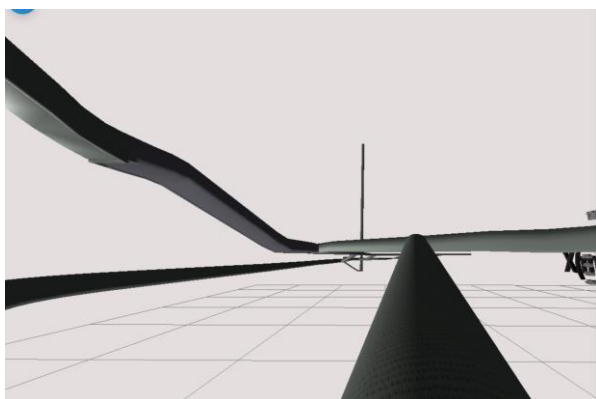
$$r = (f_z, 0, -f_x) \quad (3.27)$$

最终的移动向量是这些基本方向的线性组合：

$$v = s \cdot (w \cdot f_{planar} - s \cdot f_{planar} + d \cdot r - a \cdot r) \quad (3.28)$$

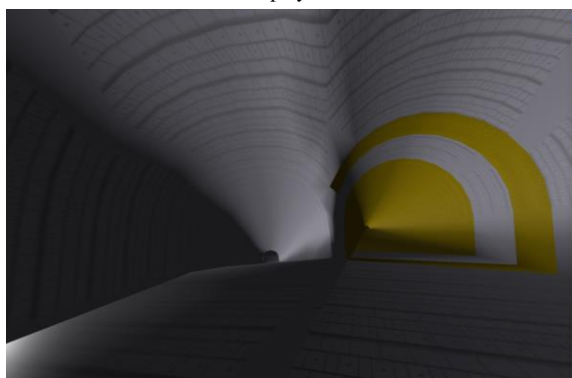
式中： s 是用户输入的移动速度大小； w 、 s 、 d 、 a 是对应键的按下状态。

通过以上流程，用户通过键盘的 W、S、D、A 的输入，给定场景中相机方向向量进行视角的前后左右的移动观察模型内部或外部（如图 3.7）。



(a) 模型外部展示

(a) External display of the model



(b) 模型内部展示

(b) Internal display of the model

图3.10巷道漫游

Fig. 3.10 Fixed projection surface mapping

3.5 本章小结

本章围绕三维地质建模与可视化的实现，详细介绍了基于 WebGL 技术的可视化方法。首先，讨论了 WebGL 和 Three.js 等核心技术在三维场景构建与模型渲染中的应用，分析了纹理 UV 坐标计算方法的核心原理和具体实现策略，为地质模型的细节表达提供了高效的技术支撑。

在交互功能方面，探讨了射线追踪、模型控制、巷道漫游等功能的设计与实现，分析了射线追踪用于模型查询与用户交互的原理和巷道漫游基于第一人称控制器的应用。基于 WebGL 的地质模型可视化的方法原理及流程，为后续可视化系统的开发奠定基础。

4 三维地质模型可视化系统开发

4.1 系统结构及功能

1、系统结构

系统采用前后端分离的模式进行开发，前端主要采用 Vue 3 、 Three.js 和 WebGL 进行三维可视化渲染^[79-81]，后端基于 Java 和 Spring 框架进行数据处理与接口服务^[82-84]。通过前后端的协作，使得系统具有良好的扩展性与性能。

(1) 前端架构

前端部分主要采用 Vue 3 框架实现，充分利用其响应式、组件化的特性提升了界面的复用性与可维护性。通过 Vue 3 的 Composition API，前端业务逻辑得以更好地模块化管理，使代码结构更清晰紧凑。此外，在三维模型的渲染方面，采用了 Three.js 与 WebGL 技术，高效利用 GPU 加速，实现了流畅且逼真的三维地质场景交互体验。

(2) 后端架构

后端服务基于 Java 与 Spring 框架搭建，主要负责地质数据的存储、处理与管理。系统利用数据库存储地质数据，支持大规模数据的高效存取。同时，后端通过 Java 实现坐标转换、Delaunay 三角剖分及地层建模等复杂计算，生成用于可视化的数据模型。

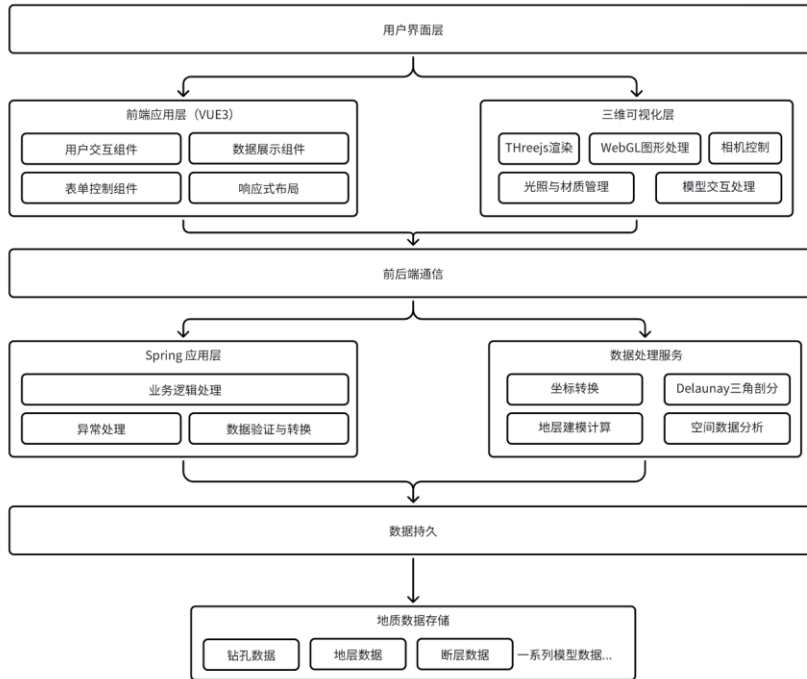


图4.1系统结构图

Fig. 4.1 System architecture diagram

2、功能介绍

系统的功能模块涵盖了三维地质建模的各个方面，以下是主要功能模块的介绍：

（1）数据导入与处理

可视化平台支持多种地质数据的导入，包括钻孔数据、地层数据、断层数据、巷道 OBJ 等从后端获取，所有数据经过后端处理后，统一转换为适用于 WebGL / Three.js 渲染的 JSON 格式，并通过 API 传输至前端，实现高效加载与交互。

（2）三维地质模型渲染

系统采用 WebGL 结合 Three.js 进行高效 GPU 渲染，支持钻孔、地层、断层、巷道等地质对象的可视化。同时，系统集成了光照、阴影、透明度、纹理映射等，以增强三维模型的真实感。用户可以自由旋转、缩放、平移模型进行地质内部结构观察。

（3）交互功能及信息展示

系统提供丰富的交互功能，用户可通过鼠标点击或触控操作与三维模型交互。射线追踪技术支持精准选取目标对象。图层管理功能允许用户按需显示或隐藏地层、断层、钻孔等数据，实现个性化分析。系统还集成测量工具，可计算地层层间距离。此外，系统提供巷道漫游模式，用户可在隧道或矿井中自由移动，以第一人称视角体验地下空间结构，满足工程模拟和勘探需求。

（5）系统优化与性能提升

在数据加载方面，系统采用 Vue 3 作为前端框架，结合其响应式数据管理特性，实现高效的组件更新与状态管理，并通过异步加载机制及增量加载策略，确保按需加载地质模型，避免因大数据渲染导致的性能下降。

（6）系统测试与应用示范

系统在开发完成后进行了多项功能测试，包括旋转、缩放、剖切、测量等交互体验测试，以及帧率、内存占用、加载速度等性能测试。此外，为验证系统的准确性，对比了地质模型的计算结果与实际勘测数据，确保层间厚度、断层位置等关键参数的精度。在实际应用方面，系统基于某地质勘探区的数据，完成了三维地质模型的构建与可视化展示，并在隧道设计、矿山开采进行了应用。

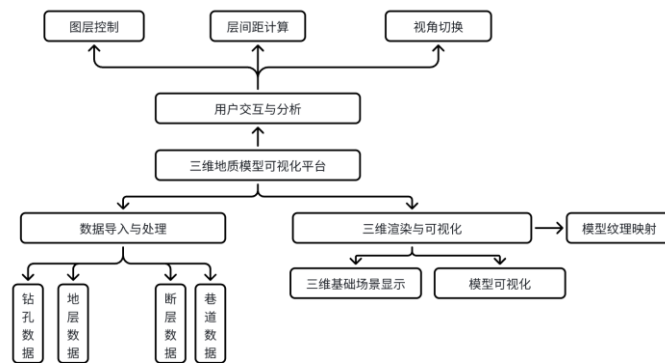


图4.2系统功能图

Fig. 4.2 System Function Diagram

4.2 模型可视化及优化

4.2.1 模型可视化

根据第三章的构建流程，先对基础的三维场景进行搭建，再对服务端发出对各个模型数据的请求，通过服务端处理返回的模型数据进一步进行可视化开发。

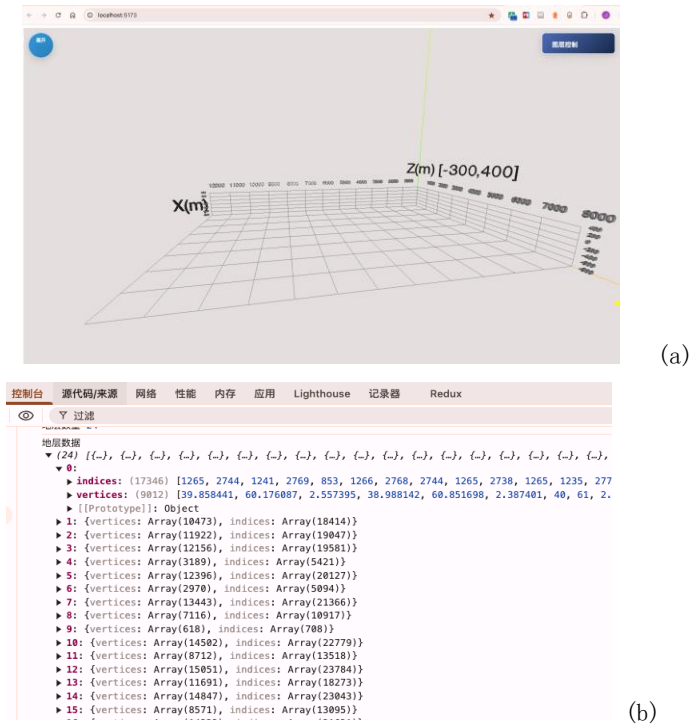


图4.3三维场景搭建和数据请求

Fig. 4.3 3D scene construction and data request

1、地层模型的可视化

Step1 依照第二章中三角剖分及地层网格生成流程，服务端对钻孔数据集进行批量处理并生成地层模型网格数据，转化为可视化所需数据格式。

Step2 浏览器请求服务端地层模型网格数据，根据保存的拓扑结构进行三角面数据的绘制渲染；计算 Phong 光照模型参数（公式 3.6）参与表面 RGB 值计算，提高表面的真实感，并支持透明度参数调节和地层分类显隐功能，以支持多层地质结构的叠加显示。

Step3 计算模型网格表面的法向量数据（公式 3.7）用于参与光照方向及 UV 纹理坐标的计算，待 UV 坐标计算完毕进行纹理贴图。

Step4 将生成的地层模型渲染到三维场景中，支持交互式观察，包括旋转、平移、缩放等功能。

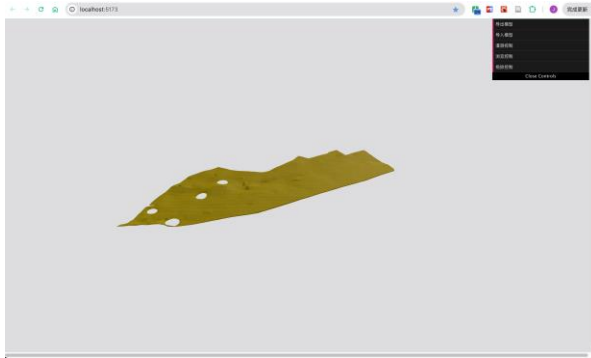


图4.4单个地层模型可视化示例

Fig. 4.2 Visualization Example of Stratigraphic Model

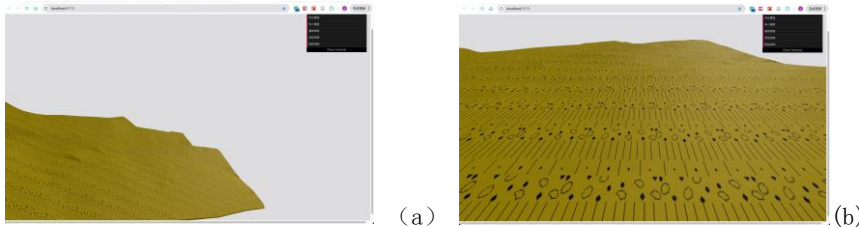


图4.5纹理细节展示

Fig. 4.5 Texture detail display

2、钻孔圆柱体的可视化

Step1 从后端接收圆柱体模型相关数据，钻孔数据按相应地层分类存储在树状结构当中，为可视化渲染做准备。

Step2 对每一个钻孔，依次处理其所有地层，根据地层的深度信息计算每一层的厚度，并确定其在垂直方向上的位置。

Step3 为每一层地层构建一个对应的圆柱体，其高度等于该层的厚度，利用钻孔的 X, Y 坐标及地层层深确定圆柱体的顶底面位置，利用地层厚度 h 确定圆柱体的高度，使各层能够无缝拼接，形成完整的钻孔结构

Step4 依据地层属性或分类，为不同地层指定颜色，以增强可视化效果，使用户能够快速区分地层的分布情况。

Step5 将生成的钻孔模型渲染到三维场景中，支持交互式观察，包括旋转、缩放、平移等功能。

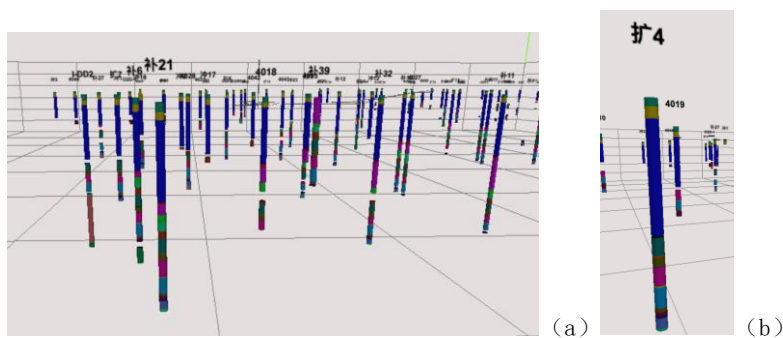


图4.6 钻孔模型可视化和局部展示

Fig. 4.6 Visualization and Local Display of Drilling Models

3、断层可视化

Step1 前端请求后端断层模型可视化数据。

Step2 遍历断层进行分批可视化处理，通过后端处理好的点数据及拓扑结构使用缓冲几何体进行点面的渲染。使用基于 Phong 光照模型的渲染方法，图层显隐。

Step3 将生成的断层模型整合到三维场景中，支持交互式观察，包括旋转、缩放、平移等功能。

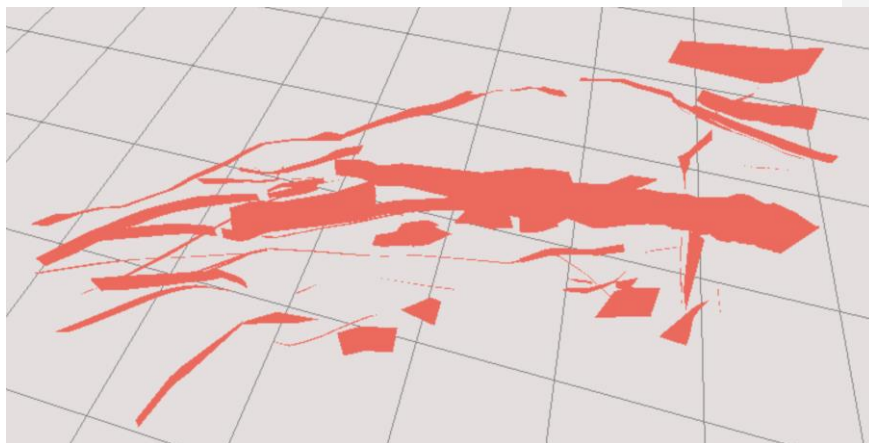


图4.7 断层模型展示

Fig. 4.7 Fault model display

4、巷道模型可视化

Step1 前端请求后端巷道模型 OBJ 文件。

Step2 使用 Three.js 对 OBJ 模型加载器讲巷道模型加载并整合到三维场景当

中。

Step3 对巷道模型进行表面法向量计算，融合 Phone 光照模型并计算模型 UV 纹理，对模型表面进行纹理映射，展示巷道材质。支持第一人称漫游控制，以观察巷道内部结构。

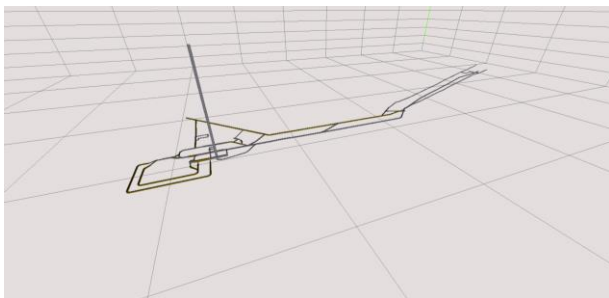


图4.8 巷道模型展示

Fig. 4.8 Tunnel model display

4.2.2 地层模型可视化优化分析

1、在地层可视化过程中，通常会涉及大量三角面片，然而这些面片的数量越多，WebGL 需要执行的 Draw Call 也就越多，增加 GPU 计算负担，导致渲染性能下降。实际上，如果相邻的三角面片法向量相似（即夹角在一定阈值内），它们在视觉效果上可以合并，从而减少渲染所需的几何体数量，提高 GPU 计算效率。基于此，提出一种基于法向量的三角面片合并方法，主要用于优化地层模型网格可视化方法。

Step1 需要计算模型表面法向量，通过公式 3.2 计算获取到模型表面法向量数据 N 并存储在内存当中。

Step2 为了判断相邻三角面片是否可以合并，我们设定一个法向量夹角阈值 $\theta_{\text{threshold}}$ ，如果两个面片的法向量夹角小于该值，则认为它们的朝向接近，可以合并，夹角计算采用公式 4.1 计算。

$$\cos(\theta) = N_1 \cdot N_2 \quad (4.1)$$

式中： N_1 和 N_2 分别是相邻两个三角面的法向量； θ 是两法向量。

Step3 如果 $\theta < \theta_{\text{threshold}}$ ，则认为两个面片可以合并，可以按如下设定， $\theta_{\text{threshold}} = 0^\circ \sim 5^\circ$ 适用于细节保持较高的场景； $\theta_{\text{threshold}} = 10^\circ \sim 15^\circ$ ，适用于优化程度更高的场景。

Step4 为了合并符合相似性条件的三角面片，可以采用区域生长算法，将具有相似法向量的三角面片归为一组，并生成更大的合并面片。选取一个起始三角面片

作为初始面；递归检查与其相邻的三角面片；如果法向量夹角小于阈值，则合并该面片，并继续向外扩展；直到所有满足条件的面片都被合并，如图 4.9 所示。

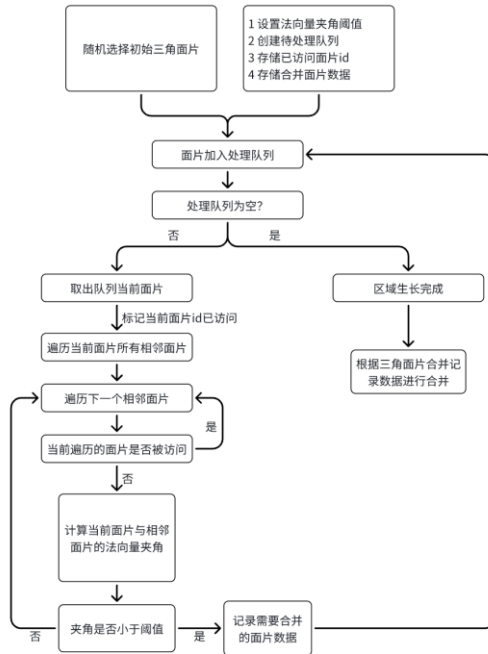


图4.9 生长算法处理流程

Fig. 4.9 Growth Algorithm Processing Flow

Step5 开辟新的存储内存，存储合并后的三角面顶点；重新计算索引数组，确保面片之间的拓扑结构正确；更新法向量数组，为合并后的面片计算新的统一法向量；传递数据到 WebGL 缓冲区，减少数据传输成本。

以图 4.10 (a) 为例，该模型具有 800 个三角网格，以 3 度作为法向量夹角阈值进行合并计算如图 4.10 (b) 三角网格减少了 94 个，合并面作为多边形几何体直接填充，从图 4.10 (c) 和 4.10 (d) 对比可视化效果，仍具备一定精度。

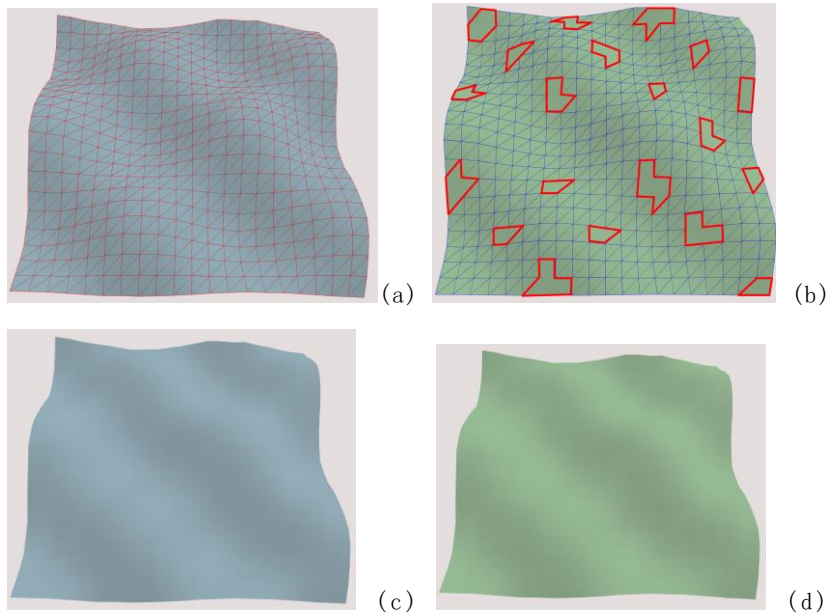


图4.10 模型对比示意图

Fig 4.10 Model Comparison Diagram

2、在 Three.js 中，单个几何体（如三角网格点线面、钻孔模型）通常作为独立对象进行渲染，但当数据量达到数万甚至数百万级别时，对于相同材质几何体的渲染每个对象会产生大量 WebGL 的 Draw Call 绘制重复调用，极大地降低 GPU 性能。因此，采用集合渲染技术，有效减少了 GPU 计算压力。

（1）优化 BufferGeometry 数据存储

采用 BufferGeometry 直接存储顶点、法向量、UV 坐标等数据，避免 Three.js 内部的对象转换，提高 GPU 处理效率。

（2）减少场景中的独立 Mesh 数量

对于大规模地层网格，采用合并几何体的方法，减少独立 Mesh 组件，使 WebGL 渲染效率提高。

（3）性能对比测试结果：

在相同场景下，传统 Mesh 渲染 FPS（帧率）下降至 10 以下，交互体验卡顿，页面响应时间明显增加，曲线图如图 4.12（a）和图 4.12（b）。

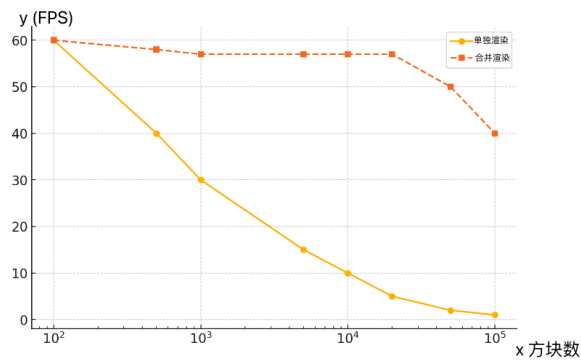
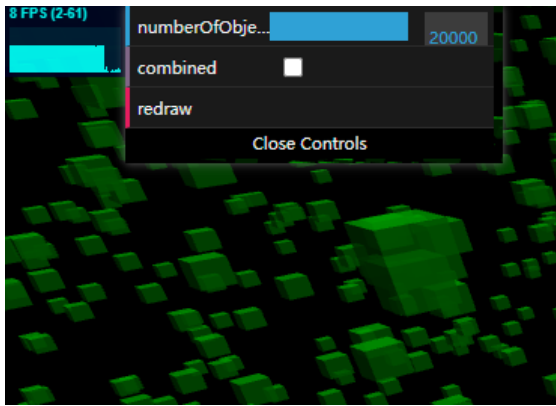


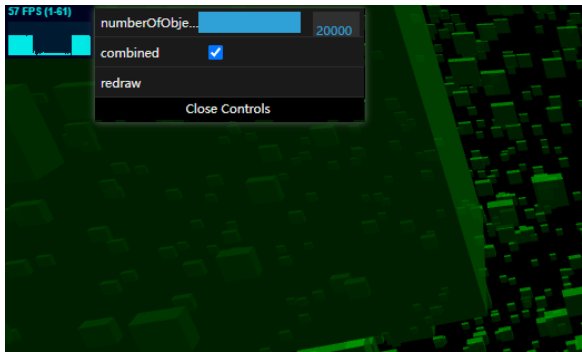
图4.11 随模型增多不同渲染方式对FPS的影响

Fig. 4.11 The impact of different rendering methods on FPS as the number of models increases



(a) 未优化的大量数据渲染性能图

(a) Unoptimized rendering performance graph for large amounts of data



(b) 优化后的大量数据渲染性能图

(b) Optimized performance graph for rendering large amounts of data

图4.12渲染性能对比

Fig. 4.12 Comparison of rendering performance

经过优化后，InstancedMesh 批量渲染，FPS 维持在 50-60 以上，交互流畅，页面响应速度显著提高。系统的渲染性能提升了约 3-5 倍，尤其在大规模三维数据可视化场景下，集合渲染显著提高了渲染效率，减少了 GPU 计算压力。

4.2.3 基于 VUE3 系统开发方法

在三维地质建模的可视化系统中，性能优化是保证流畅交互与高效渲染的关键。地质模型数据规模的增长，传统的 H5 原生开发方式在处理大量多样的地质数据时表现出一定的性能瓶颈，而 Vue3 框架的引入使得系统在组件化管理、数据更新和异步加载方面得到显著提升。

1、组件化管理的提升，通过 Vue 3 的引入，系统的前端逻辑被拆分为多个可重用的组件，页面的各个部分都可以独立开发、测试和维护，减少了代码的耦合度，并提高了系统的可扩展性和可维护性。

2、由于三维渲染和数据处理的复杂性，性能优化是系统的重要指标，在 Vue 3 框架下，可以采用懒加载与按需加载，通过 Vue 3 的动态导入功能，按需加载模块，减少初次加载的资源消耗，提高了加载速度。Vue 3 的响应式系统通过 Proxy 实现了更高效的依赖追踪和更新机制，减少了不必要的重新渲染，提升了页面响应速度。

3、通过 Vue 3 的响应式和组件化开发，系统的用户交互可以得到显著的提升。用户在操作界面时，所有的交互过程都能够即时反馈，支持实时更新与数据绑定：并且由强大的 Ant Design 组件库提供了丰富的交互组件，增强了用户操作的便利性和界面的一致性。

4、基础软件环境。

框架：VUE3

JavaScript 运行环境：node.js、npm 依赖包管理工具

浏览器：IE11 以上（需要支持 WebGL）

编辑器：VSCode

操作系统 Windows 10 专业版

5、如图 4.2 所示，基于框架开发可视化项目组件流程如下：

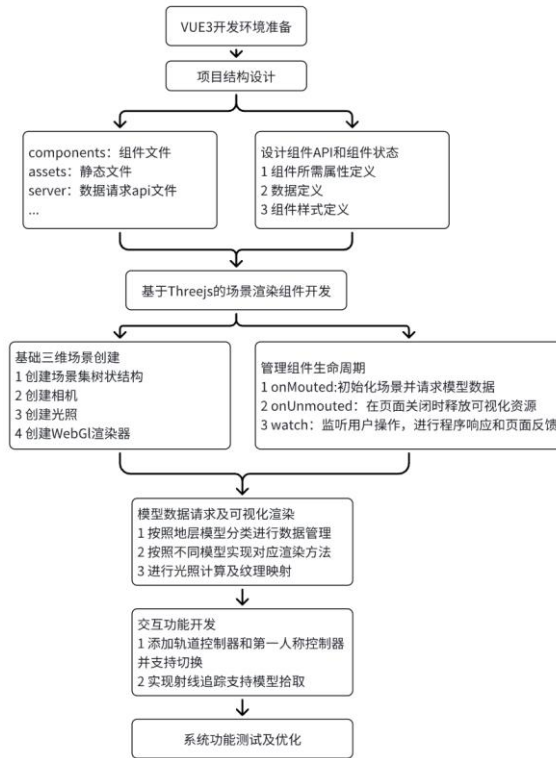


图4.13 VUE3框架开发流程图

Fig. 4.13 VUE3 Framework Development Flowchart

Step1 首先需要计算机安装 Node.js, 这是运行 Vue3 项目的基础, 在电脑命令行终端安装 VUE 脚手架 (官方提供用来快速创建和管理 Vue 项目的工具) 配置基本环节和项目结构。

Step2 根据初始项目结构, 通常分为组件文件、静态资源文件、页面组件文件、请求服务文件以及程序入口和 JavaScript 入口文件, 进行可视化工具函数、三维可视化核心场景组件等文件的创建。

Step3 进行三维可视化场景组件等开发, 通过 HTML 的容器节点即可进行 Three.js 场景渲染的开发, 利用第三章的方法进行基础三维场景的构造, 利用后端提供的 API 接口进行三维地质模型数据的请求并进行可视化渲染, 并在程序入口挂载该组件。

Step4 进一步开发相机参数控制、各类模型图层显隐控制以及层间距计算等交互功能。

Step5 对系统进行功能测试及优化。

Vue 3 与 WebGL 的结合进一步提升了交互性能，降低模型操作时的卡顿，确保复杂地质模型的可视化体验流畅、高效。

1、在初期开发测试阶段，系统采用了原生 H5 进行页面管理和模型渲染，虽然能够实现基本功能，但在复杂交互、状态管理和数据响应方面存在明显不足。原生 H5 采用 DOM 直接操作数据更新，导致在处理大规模地质数据时，页面重绘频繁，渲染性能下降。

Vue3 框架采用了虚拟 DOM 机制，使得数据变化时仅更新必要的部分，其本质是树状结构的 JavaScript 对象，他映射了真实 DOM 节点，通过内置的 diff 算法进行了节点差异性比较，只修改变化的部分，对比数据如图 4.14 所示可以显著降低 DOM 更新频率提高了整体渲染重绘的效率，操作过程如图 4.14 所示。

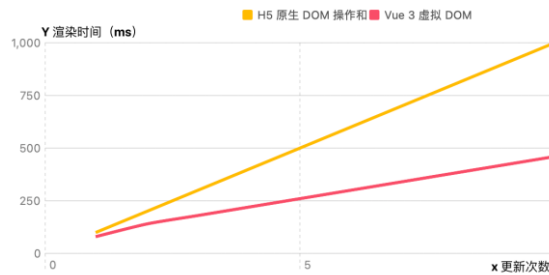


图4.14 DOM操作频次对比

Fig. 4.14 Comparison of DOM operation frequency

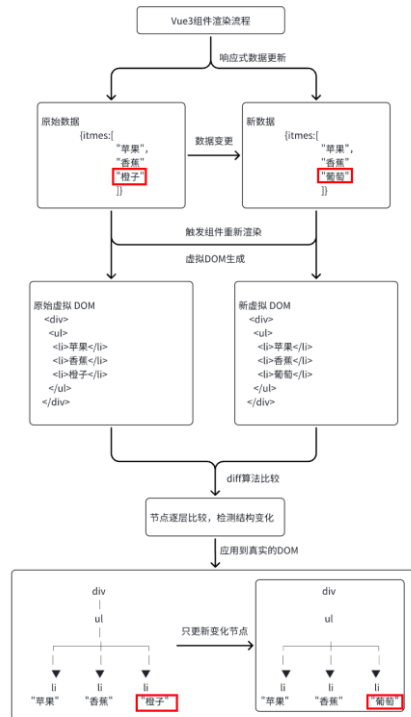


图4.15 虚拟DOM操作示意图

Fig. 4.15 Virtual DOM Operation Diagram

Vue 具备组件化架构，可以将三维可视化功能拆分为独立模块，降低代码耦合度，提升开发效率并降低维护成本。在地质数据动态加载方面，Vue 的双向数据绑定使得 UI 层能够实时响应数据的变化，避免了手动更新数据带来的额外性能消耗。

实际测试表明，在相同的数据规模的渲染场景下，Vue 框架的响应速度比原生 H5 提升约 30%-50%，尤其在数据更新频繁的应用场景下，Vue 的高效状态管理优势更加明显。

4 三维地质模型可视化系统开发

表 4.1 H5 与 Vue 框架技术指标对比

Table 4.1 Comparison of technical indicators between H5 and Vue frameworks

对比维度	H5 原生	Vue3	性能提升幅度
DOM 更新机制	直接 DOM 操作	虚拟 DOM 差分更新	40%-65%
内存占用率	12.7MB~15.3MB	9.2MB~11.8MB	27.5% ↓
首屏渲染时间	1.8s~2.4s	1.2s~1.6s	33.3% ↓
数据绑定效率	手动更新（约 320ms/万次）	响应式绑定（约 210ms/万次）	34.4% ↑
GPU 渲染帧	45~52 FPS	58~63 FPS	28.9% ↑
Web Workers 支持	基础支持	优化型异步支持	28.9% ↑

2、由于地质数据量庞大（包括钻孔、地层、断层、巷道等模型数据），若采用传统的同步加载方式，页面初始化时间会显著增加，很大影响用户体验。因此，在优化过程中，系统采用了异步数据加载与增量渲染技术，使得模型数据能够分批次动态加载，避免一次性加载造成的性能卡顿，如图。

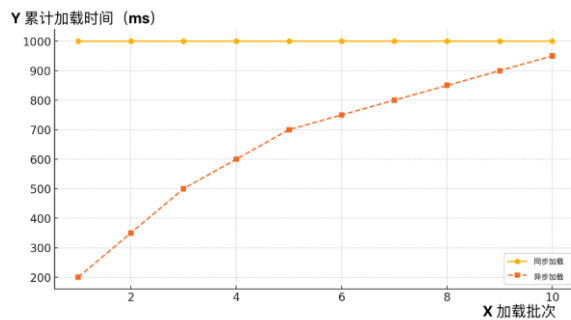


图4.16 分批次累计加载时间对比

Fig. 4.16 Comparison of cumulative loading time in batches

Step1 系统初始化时，仅加载基础场景（如场景、相机、光照、坐标轴等），避免页面首次渲染时卡顿。

Step2 通过异步请求后端接口，逐步获取地质数据（如钻孔、地层、断层、巷道等）。

Step3 为了防止数据量过大导致页面卡顿，采用分批次加载数据的方式，即优先加载核心区域或用户当前视角内的数据，并在用户交互或视角移动时，动态请求并渲染新的数据。

增量渲染机制确保新加载的数据能无缝叠加到已有的模型中，而不影响已渲染的部分，从而保持良好的交互流畅度。这种优化方式不仅减少了一次性加载带来的性能消耗，还提高了模型的加载速度，使得用户可以在数据逐步加载的过程中进行交互，而无需等待所有数据加载完毕后才能查看地质结构。

4.3 地层层间距分布计算

地层层间距是地质模型可视化中描述地层厚度的重要指标，通过三维几何建模方法，结合可视化技术，可以计算并显示不同地层间的间距分布情况。本节以几何模型的点集数据和三角面为基础，采用射线与三角形面交点检测的方法，计算当前地层点集数据到目标地层的距离，计算流程如下。

源地层和目标地层均由三角网格表示，源地层上选取任意点 P_s 作为计算的起点，目标地层由多个三角形面 $T_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 表示，每个三角形面由三个顶点 V_1, V_2, V_3 定义。

Step1 定义射线，射线是从当前三维坐标点 $P_s(x_s, y_s, z_s)$ 出发，方向指向一个拟造点 $P_t(x_s, y_s, z_s + \Delta z)$ ，射线方向 D 按照公式 4.1 计算，从源地层的离散点 P_s 发射射线按公式 4.2 定义。

$$D = P_t - P_s = (x_s, y_s, z_s + \Delta z) - (x_s, y_s, z_s) = (0, 0, \Delta z) \quad (4.1)$$

$$R(t) = P_s + t \cdot D, \quad t \geq 0 \quad (4.2)$$

式中： $P_s = (x_s, y_s, z_s)$ 为射线起点，即当前点的位置； D 为射线方向向量； Δz 是一个设定的阈值，表示拟造点与当前点之间的高度增量。

Step2 射线与三角形平面相交计算，可以利用公式 3.8 计算三角面法向量 N ，

假设 $N=(a, b, c)$ 则该三角形所在的平面方程为：

$$a(x - x_1) + b(y - y_1) + c(z - z_1) = 0 \quad (4.3)$$

展开得：

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4.4)$$

式中： $d = -(ax_1 + by_1 + cz_1)$ 。

将 $R(t)$ 代入平面方程解出 t ，如公式 4.6 得交点：

$$t = -\frac{ax_s + by_s + cz_s + d}{ad_x + bd_y + cd_z} \quad (4.5)$$

$$P = P_s + t \cdot D \quad (4.6)$$

式中： d_x , d_y , d_z 是射线方向向量的分量，此处 d_z 为 Δz 。

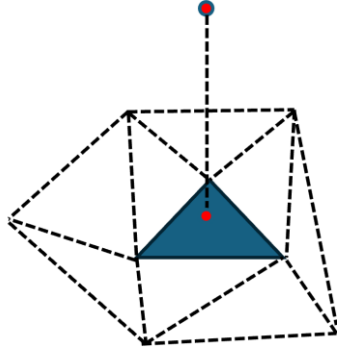


图4.17 源地层离散点向目标地层求交

Fig. 4.17 Intersection of discrete points in the source formation with the target formation target formation

Step3 判断交点是否在三角面内，可用重心坐标法，对于目标地层上的三角形面 T_i ，可按公式 4.7 表示，并按公式 4.8 和 4.9 分别计算 u 、 v 。

$$P = V_1 + u(V_2 - V_1) + v(V_3 - V_1) \quad (4.7)$$

$$u = \frac{(P - V_1) \cdot (V_3 - V_1)}{(V_2 - V_1) \cdot (V_3 - V_1)} \quad (4.8)$$

$$v = \frac{(P - V_1) \cdot (V_2 - V_1)}{(V_3 - V_1) \cdot (V_2 - V_1)} \quad (4.9)$$

如果满足 $0 \leq u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$, $u + v \leq 1$ ，则 P 在三角形内，否则该交点无效。

Step4 计算交点间距，源点 P_s 到交点 P_i 的距离按如下公式计算：

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} \quad (4.9)$$

遍历所有相交点，保存源地层点数据所计算的间距数据，并根据间距分类映射颜色进行下一步渲染。

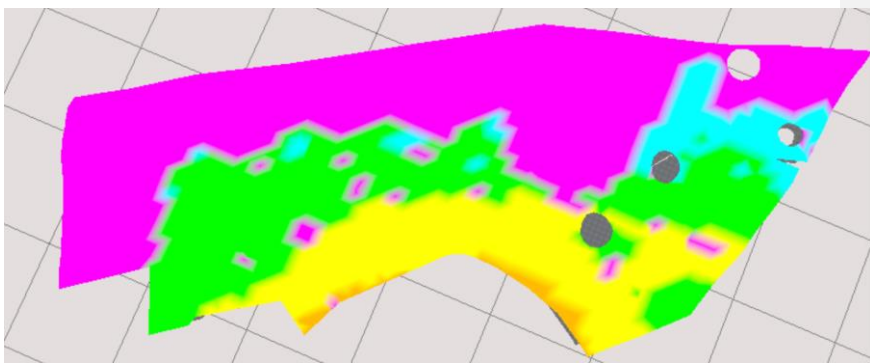


图4.18 根据层间距区间分顶点颜色渲染

Fig. 4.18 Color rendering of vertices based on interlayer spacing intervals

4.4 本章小结

本章主要介绍了三维地质建模系统的系统架构、前端技术升级与优化、核心功能模块以及地层层间距计算方法。详细讨论了前端技术的升级优化，阐述了系统的主要功能模块，包括数据导入与处理、三维地质模型渲染、数据分析与展示，以及交互功能并深入探讨了地层层间距计算的实现方法。展示了如何通过现代化的技术手段提升系统的性能和可视化效果。系统的优化与功能模块的完善，使得地质数据的可视化与分析更加高效、准确，为地质勘探和工程设计提供了强有力的支持。

5 应用实例

5.1 研究区概况

1、位置与交通

邢台矿坐落在河北省邢台市南方向。该矿区行政上隶属于邢台市。在矿区的东侧，京广铁路穿行而过，矿区东北部到邢台火车站大约有 7 公里的距离，东部到小康车站大约 4 公里。矿区设有与煤矿相关的铁路线，加之矿区内公路四通八达，因此交通十分便利。

2、地质概况

本区域属于石炭二叠系煤田，根据已知的钻孔数据，该地区的地层年代由老至新分别是奥陶系、石炭系、二叠系以及第四系。

邢台矿区地处山西中台出起的东部。该区的断层类型主要为高角度正断层，方向主要为东西向、南北向及东北向，且以北东向断裂为主。此次调查共发现了 33 条落差超过 20 米的断层，平均 1.03 条/平方公里。大、中型断层是沿近乎平行走向分布的高角度正断层，形成狭长的地块，地质构造，其中 20 米以上的断层常作为采矿区的界线。

区内构造特点可归纳如下：

（1）构造线方向特征：地层走向主要沿着 $N10^{\circ}$ 至 25° E 的新华夏系方向延伸。

（2）本区区域地层向东南方向倾斜，角度介于 5° 至 25° 之间。受到了本区区域断层的影响，区内有许多复杂地质构造产生，包括褶皱、大型断裂等。这些复杂地质情况的产生导致本区内产生很多小型正断层。这些正断层的落差在 8-12 米，对矿区的生产以及维持造成影响。

（3）断层特征：对于同一断层，不同部位的落差及断距不尽相同；同一断层自上而下其断层不连续；断层在垂直方向上运动明显，在水平方向上运动不明显，并且构造运移的影响不同部位的倾向也有所区别。

（4）构造成因：本地区的地质构造形成于燕山期，喜马拉雅运动的产生与致本区地质构造演化密切相关。

在本区域内，南北向和东西向的构造线占据了主导地位，这些构造线起源于燕山期。西部的 F1、F15、F27、F26 等断层以及东西部的 F2-1、F2 断层，分割构成了并且部和东西部的边界。

邢台矿区的地质构造特征显著，其地层完全为第四系的松散沉积物所覆盖，形成了典型的沉积覆盖地貌。本区域属于石炭二叠系煤田，根据已知的钻孔数据，该

地区的地层年代由老至新分别是奥陶系、石炭系、二叠系以及第四系。

邢台矿钻孔揭露的地层主要是中奥陶统以上地层。分述如下：

①奥陶系 (O)

该区域主要岩石类型为黄灰色、深灰色和灰色厚层状的石灰岩，某些地层中包含白云质石灰岩，特征为鲕粒状。根据勘测资料显示，本区地层的厚度在 590 米至 810 米之间，本矿区通过对已揭露地层的深入研究，发现其揭露的岩层厚度在 0.15 米至 235 米之间。

②石炭系中统本溪组 (C2b)

该组地层底部由黑褐色的铝土岩组成，其中包括菱铁矿颗粒和结核。地层的上部是由黑灰色的泥岩所构成，此组地层在沉积时水力条件稳定，所以形成水平层理。根据勘测资料显示，整个区域厚度在 19 米至 26 米之间，通过钻孔揭露的地层厚度大致在 1.60 米至 25.70 米之间。该组地层与下方地层形成平行不整合接触。

③石炭系上统太原组 (C3t)

该组地层由深灰色和灰色的泥岩、粉砂岩、灰色的砂岩、灰白色砂岩以及四层灰色至深灰色的石灰岩组成。以 9#煤为主，该层为本组主要的可采煤层。整个区域的这一地层厚度大约为 150 米，通过钻孔揭露的厚度在 117 米至 160 米之间。与下方地层呈现整合接触。

④二叠系下统 (P1)

a. 山西组 (P1s)

本组地层主要由黑灰色粉砂岩，以及黑灰色至灰色的砂岩构成，本组地层含有几层煤层，其中 2#煤是本组的主要可采煤层。通过详细的钻孔数据分析及对已揭露地层的深入研究，本组揭露的地层厚度在 39 米至 85 米之间，平均厚度为 60 米左右。

b. 下石盒子组 (P1x)

本组地层主要由灰黄色的细粒砂岩以及灰黑色的泥岩组成，其中含有少量的铝土质泥岩。这些泥岩含有为斑状结构。通过勘探资料可知，整个区域该组地层厚度大约在 170 米至 210 米之间，通过详细的钻孔数据分析及对已揭露地层的深入研究，本组揭露的地层厚度在 40 米至 120 米之间。该组地层与下方地层呈现整合接触。

⑤二叠系上统 (P2)

a. 上石盒子组 (P2s)

该组地层主要由灰色以及黄绿色的中粒砂岩以及黑灰色的泥岩构成。在底部，地层以灰黄色粗粒砂岩为标志，与下石盒子组形成分界面。而在顶部，地层以黑紫色的细粒砂岩为界线，与石千峰组进行区分。

b. 二叠系上统石千峰组 (P2sh)

本组地层主要由暗紫色砂岩以及黑灰色泥岩所构成。通过勘探资料可知, 整个区域的这组地层厚度大致为 245 米左右。

⑥第四系 (Q)

该区域主要由松散沉积物所构成, 其中卵砾石层发育良好, 展现出独特的地貌和沉积特征。这些沉积物对于研究该地区的地质历史、地貌演变以及沉积环境具有重要意义。整个区域的这一地层厚度在 110 米至 195 米之间, 通过钻孔揭露的厚度则在 12.80 米至 288.50 米之间, 平均厚度为 189.74 米。与下方的各个地层呈现不整合接触。

5.2 应用实例

本文以邢台某矿为研究背景, 以矿方提供的勘探数据为基础, 提取钻孔数据并进行预处理, 用于三维地质模型的构建, 模型包括中包括地层、断层、钻孔等。

5.2.1 三维地质模型

在进行地层建模时地层数据是按照含水层、隔水层、煤层进行分类的, 所以本文地层分为三类, 即含水层、隔水层以及煤层, 分别对它们进行介绍。

(1) 含水层

含水层是指在地质学中位于土壤通气层以下的部分, 其中物质的孔隙被水分所填满。含水层不仅可以储存一定量的水, 而且还具有一定的水流通过能力。它

们可以是多种不同类型岩石或土壤组成, 包括空隙细小的粘土层、空隙较大的砂砾石层。根据含水介质和孔隙类型, 邢台矿自上到下划分为九个主要含水层: 第四系顶砾孔隙含水层 (I)、第四系底砾孔隙含水层 (II)、石盒子组砂岩裂隙含水层 (III)、大煤顶板砂岩裂隙含水层 (IV)、野青灰岩裂隙岩溶含水层 (V)、伏青灰岩裂隙岩溶含水层 (VI)、大青灰岩裂隙岩溶含水层 (VII)、本溪灰岩裂隙岩溶含水层 (VIII) 和奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层 (IX)。

(2) 隔水层

隔水层是指透水性能较差的岩层或土层, 它们能够阻止水分的透过或流动。隔水层的作用主要是隔断毛细水, 防止地下水向上渗透到地面基层。隔水层可以由透水性良好的材料或不透水材料组成, 用于在基层与土基之间铺设的垫层。隔水层的确定通常是以岩层的渗透性大小为划分标准, 例如黏性土、由黏粒和粉粒组成的坚硬岩类 (如页岩、黏土岩、板岩), 以及裂隙极不发育的块状岩类 (如结晶岩、变质岩, 但碳酸盐岩类变质岩除外) 都被视为隔水层。在邢台矿井田内, 各个含水层

之间分布着厚度不均的隔水层，这些隔水层主要由中粉砂岩、泥岩、铝土岩以及不同厚度的岩浆岩侵入体构成。正常情况下，这些岩层能够有效地隔离水分。

（3）煤层

模型中主要包含 2#煤层、5#煤层以及 9#煤层。2#煤层的直接顶板通常是灰黑色的粉砂岩，但在某些地区，由于河流的冲刷作用，直接顶板会变成中粒到粗粒的石英砂岩。该煤层的底板一般是深灰色的泥岩和砂质泥岩，岩性变化较为显著。5#煤层的顶板由黑色粉砂岩和泥岩组成，底板通常为深黑色泥岩，岩性变化不明显。9#煤层的顶板是灰色粉砂岩，底板为深灰色的砂质泥岩和粉砂岩，岩性变化不明显。

以下是各类地质模型网格数据构建实例。

1、地层模型

地层模型通常表示地下不同岩层的空间分布。根据每层地层的岩性描述，为每层地层附上相应的颜色，图 5.1 为带颜色图例的三维地层模型。

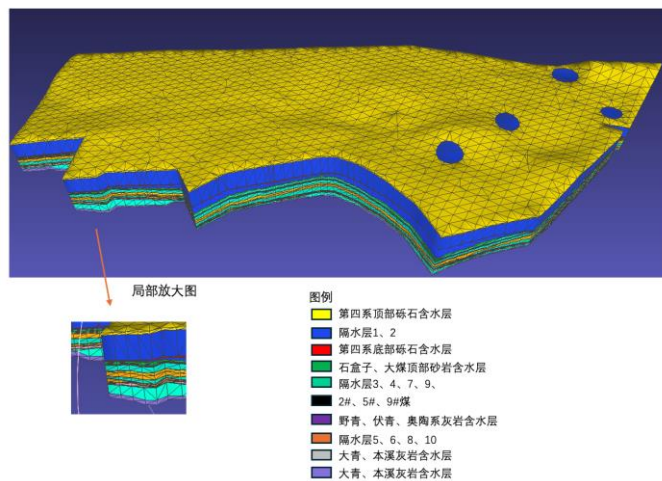


图 5.1 三维地层模型图例示意

Fig.5.1 Schematic diagram of 3D geological model legend

主要流程：

Step1 通过对原始钻孔数据预处理，根据不同地层分类离散点数据和边界数据后，进行剖分和地层的网格数据生成。

Step2 将处理好的网格数据导入到 MeshLab 工具中后，运用可视化软件 Meshlab 对巷道进行分类上色，对网格模型进行初步验证。

以下表 5.1 和 5.2 是某地层经可视化坐标转换后的部分网格拓扑结构数据。

5 应用实例

表 5.1 地层模型网格点数据示例

Table 5.1 Example of Grid Point Data for Stratigraphic Model

index	x	y	z
0	39.858	60.176	2.557
1	38.988	60.851	2.387
2	40.0	61.0	2.407
3	40.0	62.0	1.867
4	39.1937	63.734	1.272
...

表 5.2 地层模型网格三角面索引数据示例

Table 5.2 Example of Triangular Index Data for Stratigraphic Model Grid

index	Face Index1	Face Index2	Face Index3
0	1265	2744	1241
1	2769	853	1266
2	2768	2744	1265
3	2738	1265	1235
4	2774	1265	1271
...

2、断层模型

断层模型表示地下岩层的断裂情况，通常用于分析地震活动、矿产资源分布等。

Step1 断层模型的数据处理过程包括断面数据收集、数据集剖分等操作，通过程序算法将这些数据转化为三维网格模型。

Step2 断层模型在 MeshLab 中展示时，使得用户能够直观地看到断层面的位置和形态

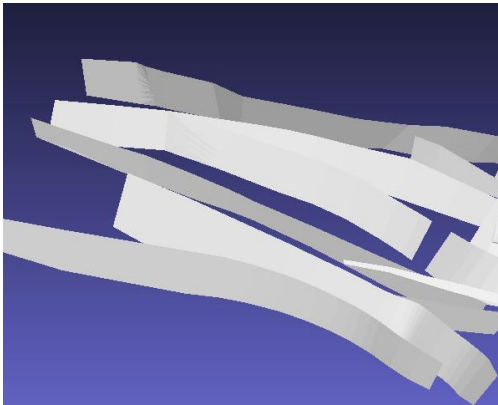


图 5.2 断层模型展示

Fig.5.2 Fault model display

以下表 5.3 和 5.4 是某断层经可视化坐标转换后的部分网格拓扑结构数据。

表 5.3 断层模型网格点数据示例

Table 5.3 Example of Index Data for Stratigraphic Model Grid Triangular Grid

index	x	y	z
0	99.371	22.591	-0.509
1	99.056	22.822	-1.234
2	100.339	24.804	-1.055
3	100.297	24.802	-0.980
4	99.096	22.792	-1.141
...

表 5.4 断层模型网格三角面索引数据示例

Table 5.4 Example of Triangular Index Data for Fault Model Grid

index	Face Index1	Face Index2	Face Index3
0	35	0	1
1	6	1	0
2	18	4	5
3	42	5	4
...

3、巷道数据展示

巷道数据展示是地下开采、隧道施工等领域的重要应用。在本研究中主要通过 OBJ 文件读取巷道的网格模型数据，为可视化中巷道漫游和纹理贴图作准备。

Step1 巷道的网格数据通常包括巷道的几何结构（如通道、交叉口、支撑结构等），通过可视化辅助，巷道模型的空间关系和细节能够被精确地表现。

Step2 在 MeshLab 中，巷道模型可以使用不同的视角、光照和纹理映射进行展示，以便清晰地展示巷道的内外结构。在展示时，可以通过透明度调整来表现巷道的内部结构。

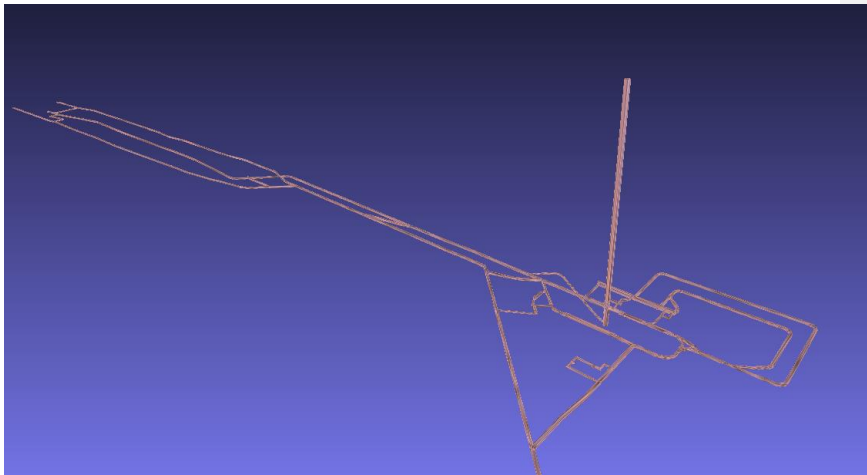


图 5.3 巷道模型展示

Fig.5.3 Tunnel model display

以下表 5.5 和 5.6 是 obj 模型文件中巷道模型部分网格拓扑结构数据，其中面索引结构略有不同，每一个索引为 Vertices(V)/ Texture Coordinates(T)/Normal(N)混合坐标索引，即顶点索引、纹理坐标索引、法向量索引。

表 5.5 巷道模型网格点数据示例

Table 5.5 Example of Grid Point Data for Tunnel Model

x	y	z
353.607056	-13.142027	7.397465
353.595947	-12.780120	10.618473
354.173584	-12.851424	10.623569
354.185181	-13.074629	7.833256
352.583618	-13.130232	8.258884
...

表 5.6 巷道模型网格三角面索引数据示例

Table 5.6 Example of Triangle Index Data for Tunnel Model Grid

complex Index1	complex Index2	complex Index3
757/2159/1462	756/2155/1426	775/2209/1494
777/2217/1495	775/2210/1496	756/2156/1497
756/2156/1498	758/2163/1485	777/2217/1499
778/2221/1500	777/2218/1493	758/2164/1426
758/2164/1426	759/2167/1435	778/2221/1500
...

通过 MeshLab 软件展示网格模型，能够帮助我们直观地验证网格的生成质量，并进一步优化网格结构，确保后续分析和应用的准确性。

5.2.2 可视化应用实例

本文以邢台某矿区作为具体研究对象，基于 WebGL 技术开发了交互式三维地质模型可视化系统，对于地层、断层、钻孔、巷道灯模型展示以及层间距计算等地质问题提供了直观的可视化分析。

系统支持对地层、断层及钻孔的三维结构建模，并通过交互方式实现多视角观察、缩放平移以及地层显隐控制，使用户能够清晰识别地层分布、断层结构及煤层特征。巷道模型的可视化则提供了三维空间布局的直观呈现，支持轨道控制与第一人称漫游，以便工程人员深入分析巷道拓扑关系、岩性特征及支护设计。层间距计算功能通过颜色映射展示地层间距的变化，使用户能够快速识别厚度异常区域，为

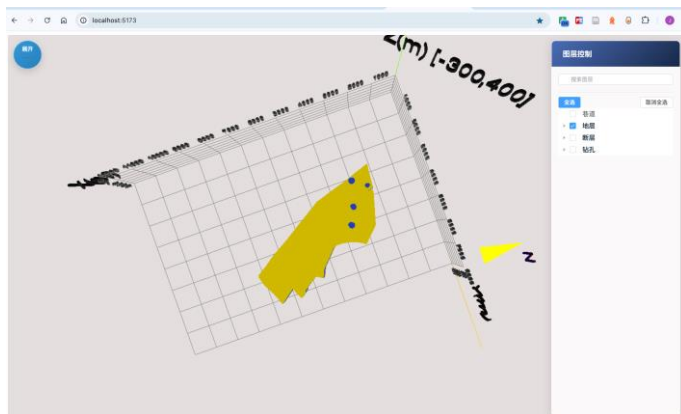
矿井规划和安全评估提供决策支持。

通过该系统，工程师可以更高效地掌握地下结构信息，提升矿井开发的科学性与安全性，为地质勘探和矿产资源管理提供重要技术支撑。

1、矿区三维地质结构可视化：

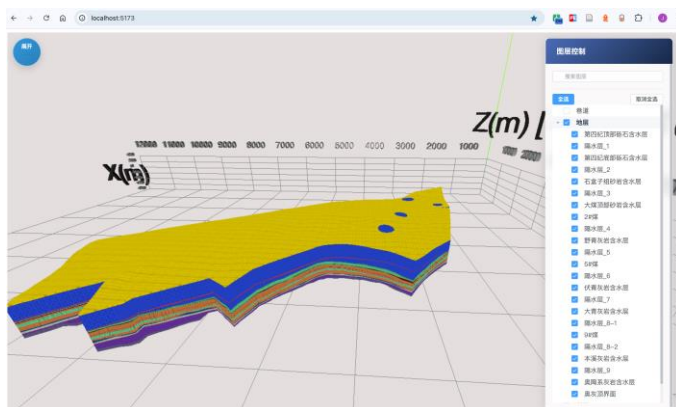
本文以邢台某矿区作为具体研究对象，通过收集和处理区域内的钻孔数据，建立了包含地层、断层及钻孔的三维地质结构模型，并以 WebGL 为基础开发了交互式三维地质模型可视化系统，实现了模型的多维度展示和交互分析

在实际应用中，用户可以通过鼠标或触控方式对三维地质模型进行直观操作，观察地层分层信息（如图 5.4（a）、图 5.4(b)所示）、断层结构（如图 5.4（c）所示），能够快速获取地下结构信息，为决策提供支持。用户通过滚轮或触控手势，可以动态调节模型视图的缩放比例，以便更加清晰地观察感兴趣的局部细节，或者快速查看地层的整体空间分布规律；通过按住鼠标左键或触摸拖动方式，用户可对进行任意方向移动，实现视角的平滑平移，便于用户灵活观察不同位置的地质结构。钻孔模型的构建以圆柱几何体为主，根据不同地层的顶底厚度计算进行分层显示（如图 5.4(d)所示）。实现地层厚度的直观表示。不同地层的颜色清晰区分了地层属性，便于用户快速理解钻孔内地质结构。

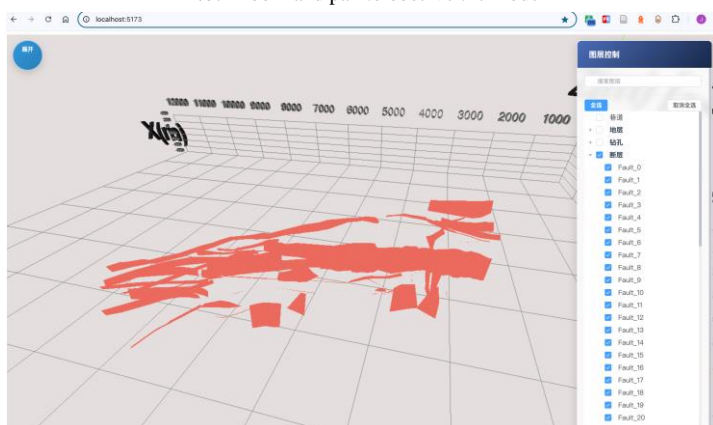


（a）俯视视角观看地层模型

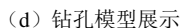
（a）Viewing the stratigraphic model from a top-down perspective



(b) Zoom and pan to observe the model



(c) Fault model display



(d) Drilling model display

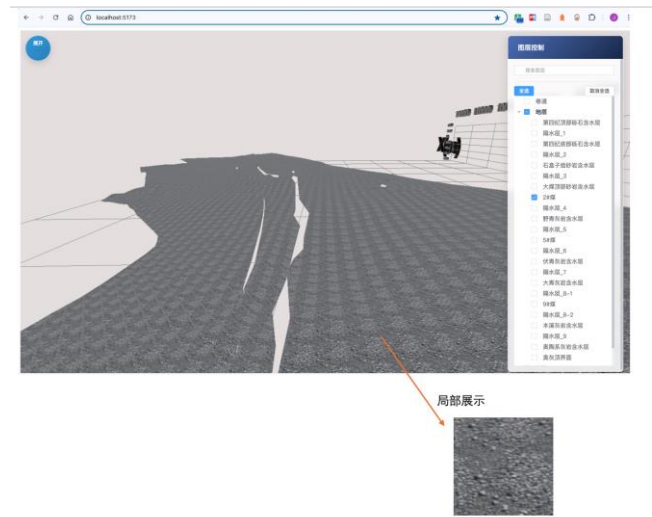
图 5.4 地层及断层模型展示图

Fig.5.4 Stratigraphic model display

本文将地层模型按照地质特征划分为三类，即含水层、隔水层以及煤层。为了提升地质模型的分析效率，系统实现了针对每个地质图层的单独显隐控制，并基于不同地层的岩性特征，在模型表面进行针对性的纹理贴图展示。主要涉及两方面技术：1：将不同类别的地层模型数据在浏览器端进行有效的分类管理。当用户通过控制面板选择特定地层进行显示或隐藏操作时，系统会在对应的场景树节点进行标记，并缓存当前的状态数据，自动触发模型场景的重渲染。2：系统根据地层模型数据计算纹理 UV 坐标，并依照岩性的不同对每层地层将相应的纹理图像映射到模型表面。岩性贴图是一种用于描述岩石或土壤的地质特征的图示方法。岩性贴图的主要作用是：1：提高设计的真实感，通过模拟岩石的纹理，使模型看起来更加真实。2：岩性贴图帮助地质工程师和决策者快速直观地识别不同类型的岩层特征。用户可以通过图层管理窗口选择性地显示或隐藏指定地层，有效解决地质结构的遮挡问题，便于用户对特定地层的单独分析。

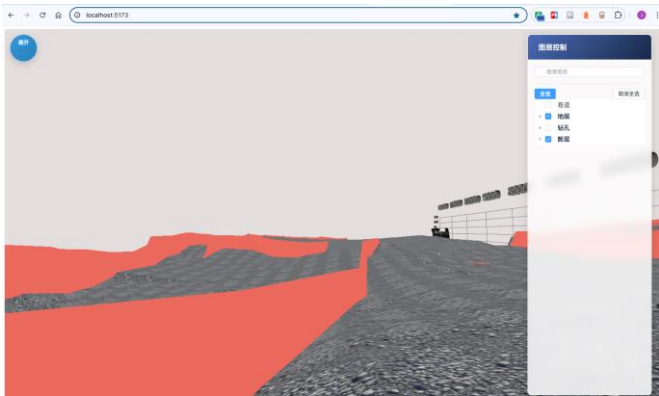
以煤层为例, 煤矿层是重要的开采资源, 以 2#煤层为具体展示对象 (如图 5.5 (a) 所示), 用户可通过控制面板隐藏除 2#煤层外的其他所有图层, 仅突出煤层进行观察。通过煤层表面的岩性纹理贴图, 用户能清晰地识别煤层的空间分布、构造情况, 更为高效、直观地掌握煤层的地质结构, 为煤矿资源的开发规划与安全生产提供重要信息。断层和地层的结合展示能够清晰地体现地质构造特征及地层变形规律 (如图 5.5 (b) 所示)。用户可以同时显示断层与相邻地层之间的空间关系, 直观地观察断层的空间位置、走向倾向、错断地层的情况以及对地层连续性的影响。

断层的存在会显著影响矿产资源的分布及开发安全，通过三维可视化技术，工程师可以准确地识别断层位置及其与特定地层的交切关系，从而在矿井开采设计、风险评估及灾害防控中提供有效的信息支持。



(a) 地层隐藏和煤层纹理细节展示

(a) Hidden strata and display of coal seam texture details



(b) 地层和断层结合展示

(b) Hidden strata and display of coal seam texture details

图 5.5 地层隐藏和煤层纹理细节展示

Fig.5.5 Hidden strata and display of coal seam texture details

2、煤矿巷道结构可视化：

巷道模型是煤矿开采设计和安全评估的重要组成部分。以邢台某矿区为例，对已有巷道模型数据进行可视化数据格式转换并从服务端获取结合 VUE3 和 WebGL 技术实现了巷道结构的可视化与交互分析（如图 5.6 所示）。

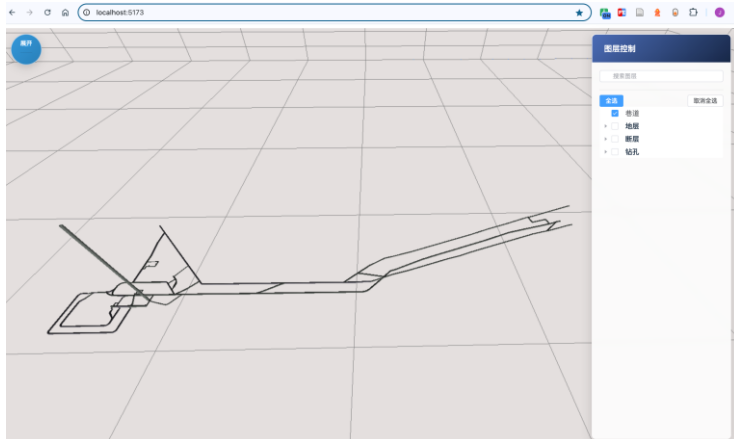


图 5.6 巷道模型展示

Fig.5.6 Tunnel model display

系统展现了巷道的三维空间位置、延伸方向及整体布局情况。系统通过三维场景实时呈现巷道空间布局结构，用户可直观查看巷道在井下的空间拓扑关系及复杂交汇情况，有利于整体掌握巷道网络分布状态，快速进行空间分析。在控制面板中提供独立的图层显示控制选项，允许用户单独显隐巷道数据，有效避免其他地质结构对巷道模型的遮挡，便于用户进行细致分析。用户还可通过控制面板进行控制模式的转换，主要是两种控制方法：1:通过轨道控制。结合鼠标或触摸交互进行视角平移、缩放等视角调整。2:通过第一人称控制，结合鼠标或触摸交互实现巷道内部自由漫游，进行原地多维度观察平移、前后左右移动等功能。一两种控制方式实现不同空间尺度的观察分析，有助于快速识别巷道空间分布特点，帮助工程人员快速掌握巷道分布结构。

系统根据巷道岩性的不同，采用特征明显的岩性纹理贴图展示巷道表面，使模型视觉效果更加真实直观。如图 5.7 所示，用户可通过管擦好巷道内部，详细观察巷道岩性的纹理特征。巷道岩性贴图的主要作用包括：1：提升模型真实感。通过模拟岩石的真实纹理和颜色，使巷道模型更直观地反映实际情况，提高设计的真实感和可信度。2：辅助巷道支护设计。不同岩性的岩体稳定性差异显著，需要采取不同的支护措施。岩性贴图能够帮助工程师快速、准确地识别岩石类型，便于制定科学合理的支护方案。3：巷道风险评估分析。通过岩性贴图可直观分析岩体性质，

从而提前识别潜在的巷道安全隐患，例如岩石破碎、顶板塌陷等稳定性问题，为安全生产提供预警和决策支持。4：指导施工过程。岩性贴图为施工人员提供清晰、直观的地质条件参考，使施工队伍能够提前了解和应对施工过程中可能遇到的地质变化，提升施工效率并降低工程风险。

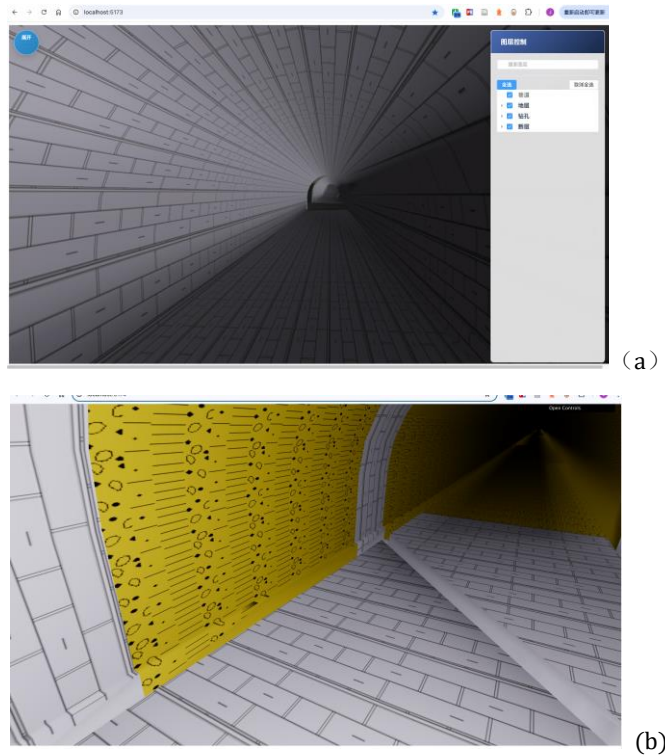


图 5.7 巷道漫游

Fig.5.7 Roaming in the alleyway

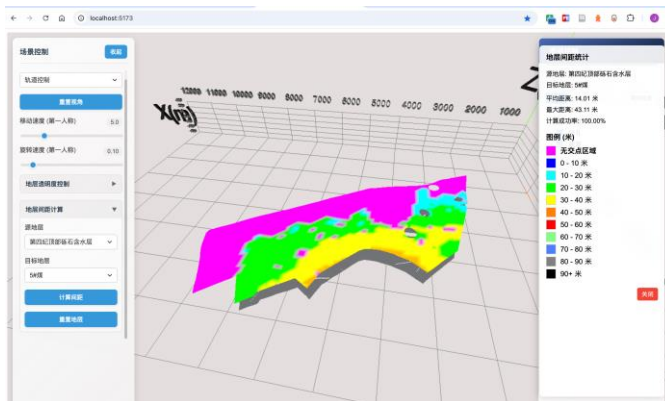
借助以上功能，工程师可直观准确地掌握巷道空间信息及布局规律，进一步提升煤矿生产过程中的安全性和管理效率。这种巷道模型的交互式可视化技术不仅能帮助工程人员快速掌握矿井巷道的分布结构，也为煤矿安全生产与地下工程规划提供有效支持。

3、地层间距计算可视化：

层间距计算是三维地质建模中用于评估地层间空间关系的重要方法。以某以含水层和煤层为例，用户通过交互面板可以进行层间距计算。根据距离大小划分为不同图例，目标地层按照距离区间分区以特定颜色渲染，从而直观呈现出不同区域的地层间距差异（如图 5.8 所示）。

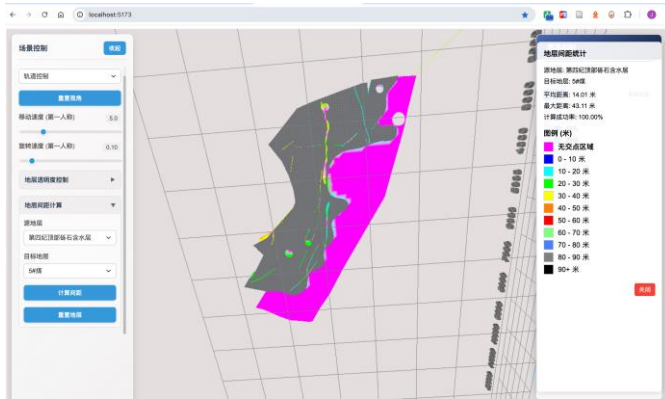
5 应用实例

通过这种层间距可视化方法，用户可以迅速识别地层间距离的空间分布特征，明确区域内可能存在的薄弱地段或厚度异常区域，从而在资源勘探、巷道布置及工程施工过程中实现针对性分析和决策支持。例如，在煤矿开采规划中，直观的层间距展示有助于提前识别采空区、采动影响区以及可能存在的薄弱夹层，为保障矿井安全与高效生产提供重要依据。



(a) 层间距计算及图例

(a) Calculation and legend of interlayer spacing



(b) 不同角度观察结果

(b) Observation results from different angles

图 5.8 层间距数据可视化展示

Fig.5.8 Visualization display of interlayer spacing data

5.4 本章小结

本章围绕三维地质模型的可视化与交互分析，介绍了基于 WebGL 技术开发的交互式三维地质可视化系统的应用。系统通过对地层、断层、钻孔、巷道等地质结构的建模与渲染，实现了高效的地质信息表达与分析。

在地层与断层可视化方面，系统支持多视角交互，提供地层显隐控制和岩性纹理映射，使用户能够直观识别地层分布、断层走向及煤层特征，为矿产资源的勘探与开采提供重要参考。巷道模型的可视化展示了矿井内部的空间拓扑关系，支持轨道控制与第一人称漫游，帮助工程人员深入分析巷道结构、支护设计及施工安全。层间距计算功能通过颜色映射方式直观展现地层间距分布，助力识别薄弱区域，为矿井规划和风险评估提供数据支撑。

6 结论与展望

本研究围绕三维地质建模与可视化技术展开，基于 WebGL 和 Three.js 进行了系统性的建模与渲染方法探索，并针对地质数据的特点提出了一系列优化策略。通过对三角剖分、断层建模、钻孔可视化以及交互功能的深入研究，构建了一套高效、直观的地质建模与可视化方案。研究成果不仅提升了地质信息表达的精度与真实性，同时为工程决策、地质勘探及学术研究提供了重要的技术支撑。

在模型构建方面，通过约束 Delaunay 三角剖分方法实现了地层与断层的高效网格划分，保证了地质模型的几何完整性。在断层建模中，采用上盘与下盘边界点处理进而剖分的方法。在钻孔建模中，提出了基于圆柱体分段渲染的可视化方法，使得钻孔地层信息能够直观展现，并结合颜色映射增强了不同地层属性的区分度。此外，模型的可视化采用 GPU 加速渲染，并结合光照与材质优化，使三维地质模型具备更高的表现力和交互体验。

在交互设计方面，研究实现了多种用户可操作的可视化分析工具。射线追踪技术被用于地质模型的点选与信息查询，使用户能够高效获取钻孔、地层及断层的详细信息。巷道漫游功能通过三维相机控制与碰撞检测，实现了用户在地下空间中的沉浸式探索，进一步提升了地质模型的直观性与应用价值。此外，地层间距计算方法结合射线与三角面相交检测，实现了不同地层厚度的精准计算，为工程设计提供了数据支撑。

本研究还对性能优化进行了深入探讨。通过异步数据加载与动态渲染技术，解决了大规模地质数据加载的性能瓶颈，确保在 Web 端能够流畅运行三维地质可视化应用。同时，针对模型渲染的内存管理问题，采用分类管理机制优化了 Three.js 场景的资源回收，减少了 GPU 负载，提高了系统的整体运行效率。最终，系统在真实地质数据环境中进行了测试，验证了其可行性与稳定性，并在多种地质应用场景中展现出良好的适用性。

尽管本研究在三维地质建模与可视化方面取得了一定的成果，但仍存在诸多值得进一步探索的问题。首先，当前的建模方法主要依赖于三角网格结构，而在处理更加复杂的地质构造（如褶皱、断层交叉等）时，仍然存在网格质量优化的挑战。未来可以引入多分辨率网格技术，进一步提高模型精度的同时降低计算开销。其次，在大规模地质数据的交互与渲染方面，虽然 GPU 加速在一定程度上提升了性能，但对于超大规模数据集的实时渲染仍然存在一定的局限性。未来可以结合 WebGPU 等新技术，进一步提升 Web 端的三维可视化能力。随着 Web 技术的进一步发展，基于 WebGL 的三维地质建模平台有望进一步扩展其功能和应用场景。例如，可以将虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术结合，提供更加沉浸式的地

质模型展示与交互功能。

此外，在纹理映射上，本研究提出的方法对于曲面几何体（如不规则曲面）仍可能面临分片参数化的问题，并且在法向量连续变化区域可能产生投影跳变，但这些问题可以通过进一步的优化和预处理阶段加以解决。未来的研究可以进一步探索如何在更复杂的几何体上进一步优化此方法的适应性，同时在计算上减少不必要的开销，提升处理速度。

参考文献

- [1] 李青元, 张洛宜, 曹代勇, 等. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J/OL]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 759-767. DOI:10.13712/j.cnki.dzykt.2016.04.018.
- [2] 王婷. 地质体三维可视化表达的现状与趋势[J]. 科技与生活, 2017, 5(6): 12-14.
- [3] 熊祖强. 工程地质三维建模及可视化技术研究[D/OL]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007[2025-02-25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFD9908&filename=2007128248.nh>.
- [4] 张洋洋, 周万蓬, 吴志春, 等. 三维地质建模技术发展现状及建模实例[J]. 东华理工大学学报(社会科学版), 2013, 32(3): 403-409.
- [5] 武强, 徐华. 数字矿山中三维地质建模方法与应用[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(12): 1996-2006.
- [6] YAN-LIN S, AI-LING Z, YOU-BIN H, 等. 3D Geological Modeling and Its Application under Complex Geological Conditions[J/OL]. Procedia Engineering, 2011, 12: 41-46. DOI:10.1016/j.proeng.2011.05.008.
- [7] 齐安文, 吴立新. 基于类三棱柱的三维地质模拟与拓扑研究[J/OL]. 矿山测量, 2003(3): 65-66, 64. DOI:10.3969/j.issn.1001-358X.2003.03.021.
- [8] Research Status of and Trends in 3D Geological Property Modeling Methods: A Review[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/11/5648>.
- [9] 李响. 三维地质建模技术的研究[D/OL]. 合肥工业大学, 2008[2025-02-25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2008&filename=2008143119.nh>.
- [10] 熊祖强. 工程地质三维建模及可视化技术研究[D/OL]. 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007[2025-02-25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFD9908&filename=2007128248.nh>.
- [11] 王洋, 赵雅诗, 王锐柯, 等. 三维地质建模技术的发展现状[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(8): 243-244.
- [12] 3D geological modelling for the design of complex underground works [EB/OL]. [2025-02-25]. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003029748-31/3d->

批注 [yjsy5]: 奇数页页眉:

(1) 参考文献部分, 内容为“参考文献”;

(2) 字体: 楷体 GB2312; 字号: 五号; 对齐方式: 居中; 间距: 段前、段后均为 0 行, 单倍行距。

参考文献标题: 一级标题, 黑体, 三号, 居中, 1.5 倍行距, 段前 12 磅, 段后 6 磅。

geological-modelling-design-complex-underground-works-giovacchini-vendramini-soldo-merlo-marchisio-ricci-eusebio.

- [13] AL-BALDAWI B A. Building A 3D Geological model Using Petrel Software for Asmari Reservoir, South Eastern Iraq[J]. 2015, 56.
- [14] MAJEED Y N A, RAMADHAN Dr A A, MAHMOOD Dr A J. Constructing 3D Geological Model for Tertiary Reservoir in Khabaz Oil Field by using Petrel software.[J/OL]. Journal of Petroleum Research and Studies, 2020, 10(2): 54-75. DOI:10.52716/jprs.v10i2.350.
- [15] Research on 3D Geological Modeling by Using GOCAD Software | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5718309/>.
- [16] CO_(2)地质封存三维地质结构建模与表征研究进展-【维普期刊官网】- 中文期刊服务平台 [EB/OL]. [2025-03-10]. <https://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=7109367326>.
- [17] 刘荣梅, 严光生, 夏庆霖. 从第34届国际地质大会看地学信息技术发展趋势[J]. 地质通报, 2013, 32(4): 685-692.
- [18] FANG J, GONG B, CAERS J. 裂缝性储层数据驱动模型证伪与不确定性量化 [J/OL]. Engineering, 2022, 18(11): 116-128. DOI:10.1016/j.eng.2022.04.015.
- [19] 赫毅勃. 基于 Web 的三维地质模型可视化系统设计与实现[D/OL]. 中国地质大学（北京）, 2022[2025-02-25]. <https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000747>. DOI:10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000747.
- [20] 程泽华. 基于 WebGL 的地质三维模型构建及可视化方法研究[D/OL]. 中国地质大学（北京）, 2021[2025-02-25]. <https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.001656>. DOI:10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.001656.
- [21] 张杰. 基于 GeoModeller 软件的山西省某工业区三维地质建模[D/OL]. 中国地质大学（北京）, 2022[2025-02-25]. <https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000477>. DOI:10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.000477.
- [22] 李梅, 姜展, 姜龙飞, 等. 三维可视化技术在智慧矿山领域的研究进展[J/OL]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 153-162. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.019.
- [23] 易永杰. 基于 WebGL 技术的高密度电阻率法虚拟仿真测量系统设计[D/OL]. 成都理工大学, 2024[2025-02-25].

- <https://doi.org/10.26986/d.cnki.gcdlc.2022.000259>.
DOI:10.26986/d.cnki.gcdlc.2022.000259.
- [24] 高云成. 基于 Cesium 的 WebGIS 三维客户端实现技术研究[D/OL]. 西安电子科技大学, 2016[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201601&filename=1015429236.nh>.
- [25] 杨菁, 陈冰凌, 王文鹏, 等. 基于 Cesium 的三维可视化场景建设及发布技术的研究[J/OL]. 测绘通报, 2021(S1): 50-53. DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0511.
- [26] 何朝阳. 滑坡实时监测预警系统关键技术及其应用研究[D/OL]. 成都理工大学, 2021[2025-02-25]. <https://doi.org/10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000159>.
DOI:10.26986/d.cnki.gcdlc.2020.000159.
- [27] From digital to mathematical models: a new look at geological and hydrodynamic modeling of oil and gas fields by means of artificial intelligence (Russian) | Oil Industry Journal | OnePetro[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://onepetro.org/OIJ/article-abstract/2019/12/144/16364/From-digital-to-mathematical-models-a-new-look-at>.
- [28] Geological Modeling Technology and Application Based on Seismic Interpretation Results under the Background of Artificial Intelligence - Peng - 2021 - Mobile Information Systems - Wiley Online Library[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2021/3584672>.
- [29] 吴莉莉. Delaunay 三角剖分的几种算法综述[J]. 科技信息, 2011(28): 119-120.
- [30] 刘兴华. 带约束三角剖分算法的研究与实现[D/OL]. 沈阳工业大学, 2010[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2010&filename=2010063833.nh>.
- [31] 杨辉. 基于激光点云的隧道开挖面岩体结构识别[J]. 科技和产业, 2022, 22(5): 362-367.
- [32] 李涛. Delaunay 三角网构建及可视化方法与实现[D/OL]. 东华理工大学, 2012[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2012&filename=1012030505.nh>.
- [33] 蔡强, 李海生, 左敏, 等. 基于 Delaunay 三角剖分的复杂地质结构建模[J]. 金属矿山, 2010(4): 126-130.
- [34] SU P, DRYSDALE R L S. A Comparison of Sequential Delaunay Triangulation Algorithms[J].

- [35] 何俊, 戴浩, 谢永强, 等. 一种改进的快速 Delaunay 三角剖分算法[J]. 系统仿真学报, 2006(11): 3055-3057.
- [36] 高莉. 改进的 Delaunay 三角剖分算法研究[D/OL]. 兰州交通大学, 2016[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD201601&filename=1015449171.nh>.
- [37] ROGNANT L, CHASSERY J M, GOZE S, 等. The Delaunay constrained triangulation: the Delaunay stable algorithms[C/OL]//1999 IEEE International Conference on Information Visualization (Cat. No. PR00210). 1999: 147-152[2025-02-25].
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/781551>. DOI:10.1109/IV.1999.781551.
- [38] 徐道柱, 刘海砚. 大量约束边条件下 Delaunay 三角网的快速生成[J/OL]. 测绘工程, 2007(3): 6-10. DOI:10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2007.03.002.
- [39] 李丽. 三维空间 Delaunay 三角剖分算法的研究及应用[D/OL]. 大连海事大学, 2011[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2011&filename=2010098465.nh>.
- [40] 徐永安, 杨钦, 吴壮志, 陈其明, 谭建荣. 三维约束 Delaunay 三角化的实现[J/OL]. 软件学报, 2001(1): 103-110. DOI:10.13328/j.cnki.jos.2001.01.013.
- [41] 陈学工, 黄晶晶. Delaunay 三角网剖分中的约束边嵌入算法[J]. 计算机工程, 2007(16): 56-58.
- [42] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004(1): 54-60.
- [43] 潘懋, 方裕, 屈红刚. 三维地质建模若干基本问题探讨[J]. 地理与地理信息科学, 2007(3): 1-5.
- [44] 刘振平. 工程地质三维建模与计算的可视化方法研究[D/OL]. 中国科学院研究生院 (武汉岩土力学研究所), 2010[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFD0911&filename=2010238553.nh>.
- [45] 吴慧欣. 三维 GIS 空间数据模型及可视化技术研究[D/OL]. 西北工业大学, 2008[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFD9908&filename=2007214255.nh>.

- [46] WU Q, XU H, ZOU X. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J/OL]. Computers & Geosciences, 2005, 31(1): 35-43. DOI:10.1016/j.cageo.2004.09.005.
- [47] LIU S, FENG Y, WANG X, et al. Cross-Platform Drilling 3D Visualization System Based on WebGL[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 5516278. DOI:10.1155/2021/5516278.
- [48] 基于钻孔的三维地质模型快速构建及更新 - 中国知网[EB/OL]. [2025-02-25]. https://kns-cnki-net-s.vpn.cumtb.edu.cn:8118/kcms2/article/abstract?v=nKtgsEmyDfNwHjKBoNHWEjL8MeB4cMaK5ohExIL8WvRzaGhXC7aD0L4Q_OcbR1xXnpX5S7921wvkJNx5DW-rpaC8B6vR4jKBv3EP25D78rrMPKCXpvJWA1oYfDpyU9FVBLLgDM8emIAT6PHZHaId6qpeWWwqtz-2gdt8wVB_eEvK7-MVFUmeZUn3vR-MxIP&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [49] 张渭军, 王文科. 基于钻孔数据的地层三维建模与可视化研究[J/OL]. 大地构造与成矿学, 2006(1): 108-113. DOI:10.16539/j.ddgzyckx.2006.01.013.
- [50] 向中林, 王妍, 王润怀, 等. 基于钻孔数据的矿山三维地质建模及可视化过程研究[J]. 地质与勘探, 2009, 45(1): 75-81.
- [51] 刘振平, 贺怀建, 朱发华. 基于钻孔数据的三维可视化快速建模技术的研究[J/OL]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 260-266. DOI:10.16285/j.rsm.2009.s1.059.
- [52] DE CARVALHO MATOSINHOS I. Intégration de la 3D sur un site Web grâce à WebGL[J/OL]. 2019[2025-02-25]. <https://folia.unifr.ch/global/documents/314791>.
- [53] DELILLO B P. WebGLU development library for WebGL[C/OL]//ACM SIGGRAPH 2010 Posters. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2010: 1[2025-02-24]. <https://doi.org/10.1145/1836845.1836989>. DOI:10.1145/1836845.1836989.
- [54] Flexible and Accessible 4D Subsurface Visualization Using a Web-Based Platform | U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium | OnePetro[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA22/All-ARMA22/510580>.
- [55] 田宜平, 吴冲龙, 翁正平, 等. 地质大数据可视化关键技术探讨[J/OL]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 29-36. DOI:10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0404.
- [56] 张华. 基于 Android 和 Web 的野外地质数据共享及可视化系统的设计与实现[D/OL]. 浙 江 大 学 , 2020[2025-02-25].

- <https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2019.000625>.
DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2019.000625.
- [57] 文娇, 易桃民, 张琪. 基于 ThreeJS 的 3D 技术在 H5 应用中的实践[C/OL]//中国新闻技术工作者联合会 2023 年学术年会论文集. 中国海南海口, 2023: 97-99[2025-02-25]. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2023.105750>.
DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.105750.
- [58] WANG Y, LI Y, TAN Y, et al. Large Scale Network Topology Visualization System Based on Three.JS[C/OL]//2016 International Conference on Artificial Intelligence: Technologies and Applications. Atlantis Press, 2016: 152-155[2025-02-25]. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/icaita-16/25849490>.
DOI:10.2991/icaita-16.2016.39.
- [59] ZHANG C, JIANG P, CHEN Y, et al. Design and Development of 3D Visualization Platform for Data Fusion in Mining Process[J/OL]. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2025, 127: 92-101. DOI:10.54097/8fwgb359.
- [60] 刘安安. 地质实验测试技术在地质找矿中的应用分析[J]. 世界有色金属, 2024(11): 109-111.
- [61] 李玺, 王文豪, 刘森, 等. 基于数字地球的装备保障系统研究与设计[J/OL]. 河北省科学院学报, 2012, 29(1): 10-14. DOI:10.16191/j.cnki.hbkx.2012.01.002.
- [62] AKENINE-MO`LLER T, HAINES E, HOFFMAN N. Real-Time Rendering, Fourth Edition[M/OL]. 4 版. New York: A K Peters/CRC Press, 2018.
DOI:10.1201/b22086.
- [63] FOLEY J D. Computer Graphics: Principles and Practice[M]. Addison-Wesley Professional, 1996.
- [64] SHAO Y, ZHENG A, HE Y, et al. 3D Geological Modeling under Extremely Complex Geological Conditions[J/OL]. Journal of Computers, 2012, 7(3): 699-705. DOI:10.4304/jcp.7.3.699-705.
- [65] Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures | Mathematical Geosciences[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11004-009-9244-2>.
- [66] A methodology for 3D modeling and visualization of geological objects | Science China Earth Sciences[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-009-0105-0>.
- [67] 肖于, 白润才. 基于包围盒与空间分解互辅的三角网相交检测方法[C/OL]//Proceedings of the 2011 International Conference on Information ,Services

- and Management Engineering(ISME 2011)(Volume 3). 中国北京, 2011: 442-445[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=IPFD&dbname=IPFD9914&filename=BJDF201112003102>.
- [68] 李伟. 集成多源数据的三维地质建模及应用研究[D/OL]. 江西理工大学, [2025][2025-02-25]. <https://doi.org/10.27176/d.cnki.gnfyc.2024.000672>. DOI:10.27176/d.cnki.gnfyc.2024.000672.
- [69] 邓浩. 面向隐伏矿体预测的三维地质建模与空间分析若干技术研究[D/OL]. 中南大学, 2009[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2009&filename=2008165201.nh>.
- [70] 汤东阳. 三维地质建模中几何形体分析技术的几个算法研究[D/OL]. 中国地质大学(北京), 2011[2025-02-25].
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2011&filename=1011077993.nh>.
- [71] 三维地质建模中几何形体碰撞检测的图形分析技术 - 中国知网[EB/OL]. [2025-02-25]. https://kns.cnki-net-s.vpn.cumtb.edu.cn:8118/kcms2/article/abstract?v=nKttgsEmyDdne09A9PGctGEY1PkLxTpyCXln7fc-P5Jeju_xoPJg3x5OohOjfr2lH1i1y-hCqF6pYGIqsv72XscYK0Q28OVVN5eerCn5tLZWe1ZoOoN6ZiffxA4xyQ7c3Rm0__6rbfXUnah_sVNHO4_YNNKEfK-uUjytQ4U_m5hWKGALed-8jxJrdmh2lY8REgrn_gGAVw=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [72] LIU L, HE J, WANG H, et al. Texture mapping of geological modeling based on parameterization[J/OL]. Earth Science Informatics, 2021, 14(4): 2101-2112. DOI:10.1007/s12145-021-00677-4.
- [73] 谭继鑫. 地质体建模中模型修复和纹理映射关键技术研究与实践[D/OL]. 武汉科技大学, 2021[2025-02-25]. <https://doi.org/10.27380/d.cnki.gwkju.2017.000104>. DOI:10.27380/d.cnki.gwkju.2017.000104.
- [74] 段毅, 李仕雄, 杨明明. 基于 OpenGL 的煤矿三维模型可视化[J]. 现代矿业, 2009, 25(3): 28-30.
- [75] 3D Interactive Visualization System for Complex Geologically Related Data | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4683278>.

- [76] Interactive Geological Data Visualization in an Immersive Environment[EB/OL]. [2025-02-25]. <https://www.mdpi.com/2220-9964/11/3/176>.
- [77] WHITELEY R J. Shallow seismic refraction interpretation with visual interactive ray trace (VIRT) modelling[J/OL]. Exploration Geophysics, 2004, 35(2): 116-123. DOI:10.1071/eg04116.
- [78] 石奉华. 巷道三维可视化建模技术 ——以东滩煤矿为例[D/OL]. 山东科技大学, 2008[2025-02-25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD2008&filename=2008013785.nh>.
- [79] 张羽西. 基于 Web 的隧道实时可视化管理系统设计及实现[D/OL]. 电子科技大学, 2022[2025-02-25]. <https://doi.org/10.27005/d.cnki.gdzku.2021.003741>. DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.003741.
- [80] 代进雄, 蒋奇, 俞锋, 等. 基于 BIM 的水利工程建设管理平台研究及应用[J/OL]. 水利水电技术 (中英文), 2022, 53(11): 37-49. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2022.11.004.
- [81] 金国梁. 基于云平台的车间数字孪生系统的设计与实现[D/OL]. 中国科学院大学 (中国科学院沈阳计算技术研究所), 2022[2025-02-25]. <https://doi.org/10.27587/d.cnki.gksjs.2022.000022>. DOI:10.27587/d.cnki.gksjs.2022.000022.
- [82] 彭诗杰. 基于微服务体系结构和面向多地质主题的数据云服务关键技术研究[D/OL]. 中国地质大学, 2019[2025-02-25]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CDFD&dbname=CDFDLAST2019&filename=1018714801.nh>.
- [83] 郇凯, 黄佳为, 王鑫, 等. 基于微服务架构的管道地质灾害监测预警系统[J/OL]. 计算机系统应用, 2022, 31(3): 65-74. DOI:10.15888/j.cnki.csa.008399.
- [84] 田峰. 基于 WebGIS 的地质遗迹公园管理系统研发[D/OL]. 中国地质大学 (北京), 2020[2025-02-25]. <https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.000735>. DOI:10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.000735.

致 谢

时光荏苒，岁月如梭，回首这段攻读硕士学位的旅程，充满了挑战、思考与成长。如今，终于完成了这篇论文，在敲下最后一个字符的这一刻，内心充满了感慨与感激。

首先，衷心感谢我的导师郝多虎教授、徐老师、杜老师。在整个研究过程中，老师们不仅为我指引了方向，还在选题、实验、论文撰写等多个环节给予了悉心的指导和无私的帮助。无论是数据处理细节，还是方法论的改进，老师总能以严谨的治学态度和丰富的科研经验给予我启发和鼓励。导师的谆谆教诲不仅让我在学术上不断进步，也让我学会了如何面对问题、如何坚持探索、如何在科研的道路上不忘初心。

其次，感谢课题组实验室的各位老师和同学们，特别是孟金洪、李雨宸、蒲耿萌等同学，在研究的不同阶段，他们给予了我许多学术上的经验分享。从系统设计到开发，从优化到调试，从数据分析到实验验证，每一次讨论都让我受益匪浅。正是这种相互学习、相互鼓励的团队氛围，使得这段科研经历充满了温暖和收获。

我要特别感谢我的家人，感谢他们一直以来的理解与支持。在这段求学的旅程中，有过焦虑和困惑，也有过熬夜赶论文的疲惫时刻，但家人的关心和包容始终是我坚实的后盾。每一次的电话问候、每一句温暖的话语，都是支撑我继续前行的动力。

此外，感谢我的母校中国矿业大学，感谢这里优越的学术环境和丰富的科研资源，让我能够沉浸于学习和研究之中。这里不仅仅是我求知的地方，更是塑造我成长的摇篮。

最后，感谢那些在学术道路上给予我鼓励与帮助的人，或许只是一次偶然的交流，或许只是简短的几句建议，但这些点点滴滴都成为了我前行路上的灯塔。论文的完成不仅是我个人努力的结果，更是所有支持我的人共同见证的成果。

愿未来的日子里，我能带着这份感恩与坚持，继续探索、继续成长。

批注 [yjsy6]: 奇数页页眉:

(1) 致谢部分，内容为“致谢”；

(2) 字体：楷体 GB2312；字号：五号；对齐方式：居中；间距：单倍行距，段前、段后均为 0 行。

致谢标题：一级标题，黑体，三号，居中，中间空两格，1.5 倍行距，段前 12 磅，段后 6 磅。

作者简介

柯峻伟，男（2000—），2018年毕业于安徽建筑大学，获学士学位；2022年9月-2025年6月在中国矿业大学（北京）攻读硕士专业学位，攻读领域为地质工程。

在学期间主要获奖

1. 2022年获得校二等奖学金。
2. 2023年获得校三等奖学金。
3. 2024年获得校二等奖学金。

在学期间参与科研项目

1. 国家自然科学基金项目“矿井突（透）水灾情演变机理与智能研判方法研究”主要研究人员。项目编号：42202274。2023年1月-2024年12月。

批注 [yjsy7]: 奇数页页眉:

- (1) 作者简介部分，内容为“作者简介”；
- (2) 字体：楷体 GB2312；字号：五号；对齐方式：居中；间距：单倍行距，段前、段后均为0行。

作者简介:

- (1) 标题“作者简介”，一级标题，黑体，三号，居中，1.5倍行距，段前12磅，段后6磅；
- (2) 作者姓名，楷体 GB2312，小四，加粗，缩进2字符；
- (3) 作者简介正文，宋体，小四，多倍行距1.25，段前、段后为0行。

批注 [yjsy8]: 如没有参与科研项目，请删除该项。