**分类号**  **学号**

**学校代码 密级**

****

硕士学位论文

**题目：基于Web的增材制造预处理平台的设计与实现**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **学位申请人** | **：** |  | **张鹏** |  |  |
| **学科专业** | **：** |  | **计算机技术** |  |  |
| **指导教师** | **：** |  | **李国宽副教授** |  |  |
| **答辩日期** | **：** |  | **2021年6月XX日** |  |  |

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements**

**for the Professional Master Degree**

**Design and implementation of additive manufacturing pretreatment platform based on Web**

**Candidate : Peng Zhang**

**Major : Computer technology**

**Supervisor : Prof. Guokuan Li**

**Huazhong University of Science and Technology**

**Wuhan 430074, P. R. China**

**June, 2021**

**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，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

**学位论文版权使用授权书**

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密□， 在 年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密□。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名： 指导教师签名：

日期： 年 月 日 日期： 年 月 日

# 摘 要

增材制造（Additive Manufacturing, AM）俗称3D打印，是一种以数字模型文件为基础，通过软件与数控系统将材料进行累加制造的方法。随着“中国制造2025”战略的提出，新的制造业将是汇集物联网、云制造、人工智能等前沿技术的大体系。针对3D打印最关键的数据处理部分，目前主要可分为开源软件和商业专用软件两类，开源软件大多只是对国外开源软件进行汉化处理，无法根据自己需求进行优化；商业专用软件则价格昂贵且操作复杂，不利于3D打印技术的普及和大众化发展。并且许多数据预处理软件载体都是本地客户端，操作完全离线，无法对数据文件进行统一管理，类似的模型处理过程没有整合封装，不利于3D打印产品的个性化定制与平台化应用发展。而随着Web3.0的时代到来，网速的快速增长，浏览器引擎的处理速度飞速提升，实时三维数据渲染的方案越来越完善，为3D打印预处理平台的构建打下了良好的基础。因此，本文通过对3D打印数据预处理过程中涉及到的流程与数据存储形式进行研究和分析，结合Web应用的优势，将打印过程分为几个核心模块，并自主开发出一个基于B(Browser)/S(Serve)模式的在线模型数据预处理应用。

首先，介绍了目前3D打印的软件需求以及行业发展现状，并根据打印流程分析，将数据处理分为几个关键模块，并简要介绍了Web应用的整个架构和全栈开发知识体系。其次，详细地阐述了系统中的数据结构，以及处理过程中涉及到的几个核心算法，采用前后端分离的开发模式实现了对系统用户和模型数据的管理，还有导入导出三维模型文件、分层切片、轨迹规划和GCode生成的功能。最后，部署在云服务器上，且在不同配置的电脑上对该网页应用进行试验验证。试验结果表明，增材制造数据预处理流程可以与Web应用良好地结合，用户交互界面合理，操作可行性强，算法执行效率高，基本上可以满足3D打印的数据处理需求，并且具备较高的扩展性和可移植性。

**关键词：**3D打印；Vue；Three.js；MongoDB；Express.js；数据处理；

# Abstract

英文摘要字体为Times New Roman，小四，1.5倍行距。

英文摘要和关键词应与中文相对应。英语摘要用词应准确，使用本学科通用的词汇；摘要中主语（作用）常常省略，因而一般使用被动语态；应使用正确的时态，并要注意主、谓语的一致，必要的冠词不能省略。

**Key words:** Optical microscopy; Brain; Neuron

**目** **录**

[题目：基于Web的增材制造预处理平台的设计与实现 I](#_Toc66314599)

[A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements II](#_Toc66314600)

[for the Professional Master Degree II](#_Toc66314601)

[摘 要 I](#_Toc66314602)

[Abstract II](#_Toc66314603)

[1. 绪论 1](#_Toc66314604)

[1.1 课题背景及研究意义 1](#_Toc66314605)

[1.2 国内外研究现状 2](#_Toc66314606)

[1.3 本文研究内容及安排 10](#_Toc66314607)

[2. 增材制造预处理Web平台的关键技术及原理 13](#_Toc66314608)

[2.1 项目整体概述 13](#_Toc66314609)

[2.2 涉及关键技术 14](#_Toc66314610)

[2.3 本章小结 23](#_Toc66314611)

[3. 需求分析及概要设计 23](#_Toc66314612)

[3.1 需求分析 23](#_Toc66314613)

[3.2 系统流程设计 23](#_Toc66314614)

[3.3 开发环境搭建 23](#_Toc66314615)

[3.4 本章小结 23](#_Toc66314616)

[4. 相关算法及Web端实现 24](#_Toc66314617)

[4.1 STL模型文件 24](#_Toc66314618)

[4.2 STL文件拓扑重建 24](#_Toc66314619)

[4.3 STL模型等厚分层处理算法 24](#_Toc66314620)

[4.4 轨迹规划算法 24](#_Toc66314621)

[4.5 GCode生成 25](#_Toc66314622)

[4.6 本章小结 25](#_Toc66314623)

[5. Web应用系统实现与测试 26](#_Toc66314624)

[5.1 应用开发环境 26](#_Toc66314625)

[5.2 界面设计 26](#_Toc66314626)

[5.3 数据库设计 26](#_Toc66314627)

[5.4 服务端设计 26](#_Toc66314628)

[5.5 项目部署 26](#_Toc66314629)

[5.6 系统展示 26](#_Toc66314630)

[5.7 本章小结 26](#_Toc66314631)

[6. 总结与展望 27](#_Toc66314632)

[6.1 本文主要内容及结论 27](#_Toc66314633)

[6.2 本文的主要创新点 27](#_Toc66314634)

[6.3 展望 27](#_Toc66314635)

[致 谢 27](#_Toc66314636)

[参考文献 28](#_Toc66314637)

[附录1 中英文缩写对照表 32](#_Toc66314638)

目录编写要求：

1. 目录自动生成时，只需列出二级标题；
2. 中文宋体，小四，行距：1.5倍；
3. 注意避免出现不具辨识度的标题：如材料与方法、实验结果、分析与讨论、结论，若属于这种类型的论文时，可以把结果部分拆开，根据结果拟定题目。

# 绪论

## 课题背景及研究意义

中国近十一年来一直位列全球制造大国之首，因此制造业是事关国民经济命脉的主要支柱产业，代表了国家的科技发展与综合实力水平。2015年两会上初次提出“中国制造2025”的重要战略规划与目标，未来的制造业无疑是要结合物联网、云制造、人工智能等前沿信息技术，朝着智能制造的方向发展。

3D打印又被称为增材制造、积层制造，是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术，该技术最早提出于20世纪80年代。常用于模具制造、工业设计等领域，后逐渐用于一些产品的直接制造，与传统加工工艺对比起来，增材制造加工效率高，耗材低，易于成型，且可以满足定制化需求，是制造业中比较颠覆性的技术。目前，根据打印的工艺和成型材料，可以将3D打印分为立体光刻、熔融沉积成型、立体平板印刷、选择性激光烧结、电子束自由成形制造和分层实体制造等方法[1]。3D打印的过程可以由离散和堆积两大部分组成：离散是使用一系列的平面对数据模型进行切片处理，获得每一层平面的轮廓；分层切片后根据不同的工艺要求，对每个轮廓进行计算处理，得到模型每一层的加工路径，再将加工路径翻译成打印机器可执行的加工代码，使得机器可以根据生成的代码进行加工，这就是堆积的过程。

在3D打印整个流程中最核心的部分就是对模型数据的处理，不同的参数以及计算算法都将直接影响产品的质量和精度。针对模型的数据处理就要涉及到模型导入、模型拓扑重建、模型切片、扫描路径生成等步骤，在实际生产过程中可能要使用到多个软件，并且大多数开源软件都是一种黑盒模式，无法进行自适应优化处理，同一个模型使用不同软件得到的打印代码都是有偏差的，因此无法满足专业人士的需求，而且处理过程的繁琐也不利于3D打印技术面向大众进行推广。

众所周知，自二十一世纪以年来发展最快的就是互联网行业，以互联网为载体的信息技术已经逐渐改变传统生产及商业模式，引发全球工业产业的技术升级。尤其在近几年基于浏览器的应用蓬勃发展，每年的在线应用都是成倍增长，甚至客户端软件都开始逐步开发Web端应用，比如CAD绘图，Web版Photoshop以及在线视频剪辑等。所以研究如何将3D打印流程结合Web应用，使得操作精简化、计算统一化、数据共享化、功能平台化，这将具有十分重要的现实意义。

## 国内外研究现状

### 3D打印技术研究现状

3D打印与传统制造工业相比，最直观的感受就是它不需要模具，而是可以利用计算机建模的数据，就可以通过逐层累加的方式进行填充打印。相对于传统的材料去除(切削加工)技术，是一种“自上而下”材料累加的制造方法。自20世纪80年代末增材制造技术逐步发展，期间也被称为“材料累加制造”(Material increase manufacturing)、“快速原型”(Rapid proto-typing)、“分层制造”(Layered manufacturing)、“实体自由制造”(Solid free － Form fabrication)等[4]。从名称各异的叫法中我们就能得知该制造技术的特点。美国材料与试验协会国际委员会对增材制造和 3D 打印有明确的概念定义。3D 打印是指采用打印喷头或其他打印技术沉积材料来制造物体的技术，3D 打印也常用来表示“增材制造”技术，在特指设备时，3D 打印是指相对价格或总体功能低端的增材制造设备[5]。

根据打印材料、形成模型方式不同，3D打印方法主要分为六类，分别是：熔融沉积成形（Fused Deposition Modeling，简称为FDM）、金属激光熔融沉淀（Laser Metal Deposition，简称为LMD）、光固化几何体成形（Stereo lithography Apparatus，简称为SLA）、选择性激光烧结（Selective Laser Sintering,，简称为SLS）、分层实体制造（Laminated Object Manufacturing，简称为LOM）、电子束熔融（Electron Beam Melting，简称为EBM）[6]。其中最常见的3D打印技术就是FDM技术，FDM技术最早是由美国的Scott Crump博士于1988年研制成功，它具有材料成本低、利用率高、成形速度快、设备小巧、操作简单等特点[3]。该技术适用于大多数复杂模型的制造，被广泛应用在建筑模型设计、医疗器械制备、航空机械零件生产等领域。

FDM技术的主要流程是，先通过建模软件得到满足需求的模型文件，再将得到的模型文件通过专业软件进行分层切片处理，根据切片得到的轮廓判定轮廓之间的内外关系，再根据轮廓形成的不同包络区域进行路径规划填充，最后将规划路径转为打印机可执行的G代码。打印机读取GCode之后，加热打印喷头，将融化的材料匀速挤出，沿着每个切片平面方向进行均匀涂抹，直至不断调整高度填充整个模型，就生成了最终的打印形件。FDM打印机结构如图 1‑1所示：

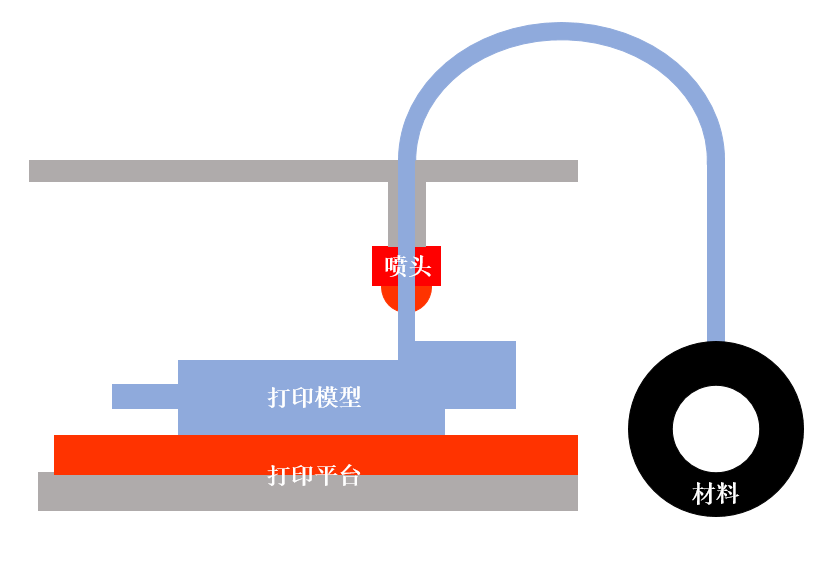


图 1‑1 FDM打印机结构示意图

3D打印的基础流程包括以下五个方面：

1. 三维模型建模：目前市场上三维模型制作方式有很多种，比如人工建模，扫描建模，照片建模等等，根据不同的建模方式选择的软件也有所不同，如：CAD、3DMax、Zbrush、SketchUp等。三维模型生成方式十分灵活，还可以添加渲染、特效、特殊材料等，满足用户的个性化需求。
2. STL文件格式转换：常见的三维文件格式有：ABC（动画模型文件格式）、glTF（动画模型文件格式）、FBX（3D文件格式）、BVH（人体特征动画文件格式）、OBJ（标准3D模型文件格式）、DAE（纯文本模型格式）、STL（三角网格文件格式）、3DS（早期3D文件格式）等，不同的文件格式适用的场景不一样，并且现在市面上有许多软件都可以将不同格式的文件进行互相转换，由于本文研究基于三角面片网格模型，所以我们选择的是STL格式的三维模型。
3. 分层处理：模型在结构上是由一个个三角面片组成，所以需要对STL文件进行分层切片，将同一层相邻的面片顺序存储在每个轮廓的数据结构中，分的层数越多，模型精度就越高，但是耗费的计算时间以及计算空间就越大。
4. 路径规划：分层处理后，将得到各个轮廓的数据集，需要遍历轮廓找出内外轮廓关系，划分不同的填充区域，还要根据打印机特性设置不同的填充方式，保证有效合理地去生成打印轨迹。
5. 打印成品：打印机根据生成的GCode文件，控制打印针头沿着预设的轨迹、速度、喷丝方向进行堆积喷涂，直至最终形成三维实体器件。

在打印的过程中，数据信息流的传递方式如图 1‑2所示：

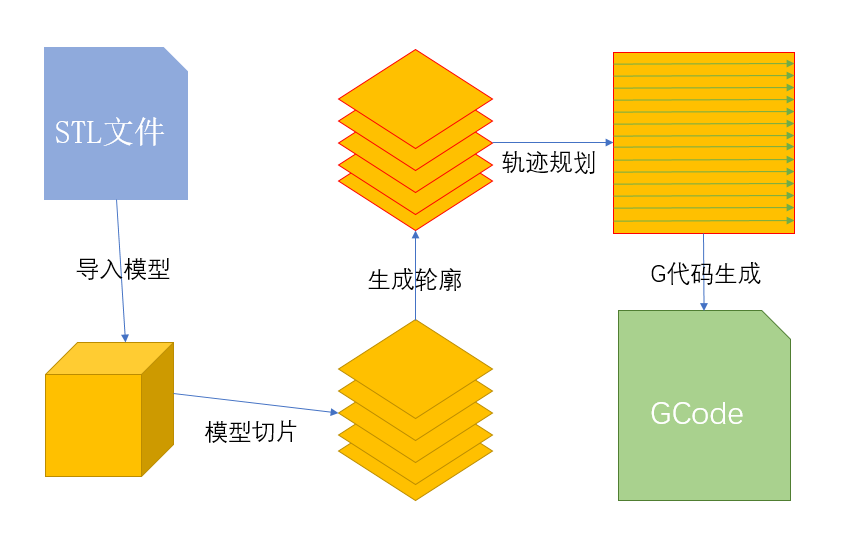


图 1‑2 3D打印过程数据信息流示意图

预处理的过程通常就需要用到专业的三维数据处理软件，传统的商业计算机三维设计软件大致可以分为三类。一类是面向工业产品设计制造的计算机辅助设计系统（Computer-Aided-Design）系统，另一类是主要用于电影、动画、游戏等行业的计算机图形系统（Graphic），最后一类就是面向3D打印的制造应用三维模型设计系统[7]。

从1960年代Ivan Sutherland博士提出的SketchPad[8]系统开始，计算机辅助设计系统已经有50多年历史了。在1970和1980年代，Rochester大学的Herb Voelcker等人开展了大量对CSG（Constructive Solid Geometry）建模技术的研究[9-11]，并研发出了PADL建模器；剑桥大学的Ian Braid和Charles Lang等人大力发展了BRep（Boundary Representation）建模技术[12-14]，导致了ACIS等建模器的诞生。此后SolidWorks公司和AutoDesk公司分别于1995年和1999年发布了SolidWorks设计系统和Inventor设计系统，这两者就成为计算机三维辅助设计软件的首要选择。而随着3D打印技术的逐渐热门，市场上开始推出一些专门为3D打印而开发的三维建模软件，比如：Cura，CraftWare，Simplify3D等[15]。这些软件都有着直观、快速、易用等特点，适合初学者上手，并且有着模型支撑设置以及丰富的预览功能，使得专业用户也常常会选择这些软件。

而国内3D打印软件的研究始于90年代,不同机构根据成形原理、打印材料和加工工艺等方面做出了一些比较成形的软件[16]。尽管国内研究起步晚，但是也有一些科研团队在3D打印领域处于领先地位，比如华中科技大学的史玉升教授，已开发出多款能打印复杂模型的3D打印机，面向的是高端制造业，产品价格极高。而对于大众化的3D打印市场，国内暂时只有数十家企业在从事经济型3D打印机的制造，而这些3D打印机软件都是利用国外开源软件进行汉化处理，对于核心算法无法进行改进，利用开源软件去进行商业化使用也容易涉及到知识产权的问题，所以如何将核心技术掌握在自己手里，并且将其作为一个产业化发展去考虑与实践，这是将来国内3D打印行业需要突破的地方。

### Web技术研究现状

1989年欧洲核子研究中心实验室研究员蒂姆·伯纳斯·李（Tim Berners-Lee）发明了万维网[17]，是互联网史上具有划时代意义的事件，自此之后Web应用开始爆炸式的繁荣起来。下面是Web发展的几个里程碑事件：

1.HTML（Hyper Text Markup Language）：HTML是由万维网发明者Tim Berners-Lee和同事Daniel W. Connolly于1990年创立的一种标记语言[18]。它通过标记式的指令，将影像、声音、图片、文字动画、影视等内容显示出来，是编写静态网页的标准语言，是今后网页必不可少的基本元素。

2. Mosaic浏览器：Mosaic是互联网历史上第一个普遍使用和能够显示图片的网页浏览器，在1993年发表，并于1997年1月7日正式终止开发和支持[19]。由于是第一款具有方便易用的图形界面的浏览器，让当时许多人了解到了Internet，尽管后来停止了前进的脚步，但是它对后来出现的浏览器影响深远。

3.CSS（Cascading Style Sheets）：早期的网页无法提供页面的装饰，只有单调的文字排布，并且要在HTML中内嵌进修饰的代码会使得HTML的结构变得臃肿混乱。因此在1994 年，Håkon Wium Lie 最初提出了 CSS 的想法，联合当时正在设计 Argo 的浏览器的Bert Bos，创造了 CSS 的最初版本，并在1996 年 12 月，W3C 推出了 CSS 规范的第一版本[20]。

4.JavaScript：JavaScript是一种基于客户端浏览器的网页脚本语言，它可以直接和HTML文档整合，其编译过程不需要专门的编译器，通过浏览器进行逐行解释和执行[23]。最早是由网景公司（Netscape）发明，主要目的是想用一个脚本语言来解决一些表单的验证问题，而真正开始影响到Web开发进程的事件是1999年IE4.0发布，内置异步通讯的组件，允许脚本语言发送HTTP请求到服务器，这就是Ajax的原型。

5.Ajax（Asynchronous Javascript And XML）：Ajax是指一种创建交互式、快速动态网页应用的网页开发技术，无需重新加载整个页面的情况下，能够更新部分网页的技术，最早于1998年前后得到应用[22]。在该项技术发明之前，我们网页的交互方式是用户点击一个按钮后，需要等待漫长的数据和服务器的交互，期间用户无法进行任何操作，而Ajax的作用就是让应用向服务器进行请求交互时，用户不必等待结果，而是可以同时对页面做其它操作，使得用户体验得到大大的提高，也为前后端分离的开发模式奠定了基础。

6.Flash：互联网Web应用的兴起，用户对于在网页上获取图像和动画的需求变得越来越强烈，于是Flash应运而生。Flash 最早期的版本称为Future Splash Animator，是1996年11月，乔纳森·盖伊(Jonathan Gay)和他的六人小组编写而成[21]。经过多年的开发迭代，于2005年9月，Flash 8.0发布，增强了对视频的支持，可将其打包成flv文件，同年，Adobe耗资34亿美元并购Macromedia，Flash正式成为Adboe公司旗下的产品。由于可以在浏览器中播放动画，Flash开始异军突起引爆了整个流媒体行业，并在2007年左右，随着Flash 的交互技术进步，网页游戏的浪潮开始席卷全球，在2010年Flash达到巅峰，直至2015年HTML5的兴起和移动互联网的发展，再加上Flash本身的安全性问题，Flash才渐渐地退出历史舞台。

7.jQuery：jQuery是2006年发布的一个免费开源并且跨浏览器的JavaScript框架,其核心设计理念是写更少的代码，做更多的事情（Write Less Do More）[24]。jQuery最大的优点就是减少了开发者对页面DOM树的维护，封装了许多JavaScript处理函数以及Ajax异步调用实现的封装，并且都做了兼容性处理，大大减小了JavaScript操作页面的复杂度，使得JavaScript 代码和 HTML 代码完全分离，便于代码的维护和修改。

8. Google Chrome：Google浏览器，是一款由Google公司开发的网页浏览器，于2008年9月发布beta版本，Chrome使用Apple的开源内核webkit，良好的设计标准和市场反应，促进浏览器快速迭代，直接撼动了IE在浏览器界的地位。由于它便捷的调试工具以及丰富的插件市场，受到了广大Web程序开发者的喜爱。

9.Github：Linux创始人Linus Torvalds在2005年就开发了Git的原型程序，是为版本管理而设计的软件，在发布之初，Git 由于其艰涩难懂，只有部分黑客愿意使用。但随着众多开发者的共同努力，Git迅速成为最流行的分布式版本控制系统，尤其是2008年，GitHub网站上线，它为开源项目免费提供Git存储，无数开源项目开始迁移至GitHub，包括jQuery，PHP，Ruby等等[25]，为互联网行业的飞速发展打下了基石。

10. Bootstrap：2011年Twitter开源的网页GUI框架，作用就好比jQuery对JavaScript进行了浏览器兼容，那么Bootstrap则是兼容了不同浏览器的CSS部分[26]。它带来的好处就是你无需知道CSS，无需前端，只要根据文档说明，就可以快速搭建起一个美观的网页，让开发者重心放在页面的逻辑交互，而不是处理各个浏览器的样式兼容，虽然它会导致页面的千篇一律，但是它为了解决响应式问题所提出的栅格化系统，是今后各式各样的UI框架借鉴的鼻祖。

11. Chrome V8引擎：V8引擎是一个JavaScript引擎实现，最初由一些语言方面专家设计，后被谷歌收购，在2008年9月谷歌对其进行了开源。V8使用C++开发，在运行JavaScript之前，相比其它的JavaScript的引擎转换成字节码或解释执行，V8将其编译成原生机器码（IA-32, x86-64, ARM, or MIPS CPUs），并且使用了如内联缓存（inline caching）等方法来提高性能[27]。有了这些功能，JavaScript程序在V8引擎下的运行速度媲美二进制程序。V8支持众多操作系统，如windows、linux、android等，也支持其他硬件架构，如IA32,X64,ARM等，具有很好的可移植和跨平台特性。

12.Node.js：由于V8引擎的出现，满足了对高性能Web服务器的想象，于是在2009年5月由Ryan Dahl开发，基于Chrome V8引擎的JavaScript运行环境就此诞生[28]。它是一个事件驱动、非阻塞式I/O模型，可以让JavaScript 运行在服务端的开发平台，后面在Node.js的基础上又推出了NPM包管理器，让大量工具包得以共享使用，推动着前端行业的增量式发展。

13.HTML5+CSS3：2014年10月HTML5规范制定完成，HTML5相比于HTML而言，增添了许多标签，可以更多维度的构建出对用户有价值的数据。HTML5的APP Cache以及本地存储功能大大缩短了一些APP的启动时间，同时，HTML5通过将内部和外部的数据直接连接，有效的解决了设备之间的兼容性问题，此外，HTML5具有动画、多媒体模块、三维特性等等，可以替代部分Flash和Silverlight能够实现的功能，并且具有更好的处理效率[29]。CSS3则是在CSS的基础上，采用模块化开发结构包括框模型、动画模型、背景与边框模型、文字效果、列表展示、多列布局等等，还补充了HTML5中的文本样式[30]。对于开发者来说，可以用更简洁的代码，得到更丰富的页面效果，大大地提高了工作效率。

14.前后端分离模式：早期网站的服务模式是发送一个http请求，然后服务器对请求做完处理，最后将静态的资源返回到页面中，因此所有静态资源和业务代码统一部署在同一台服务器上，整个流程如图 1‑3所示：

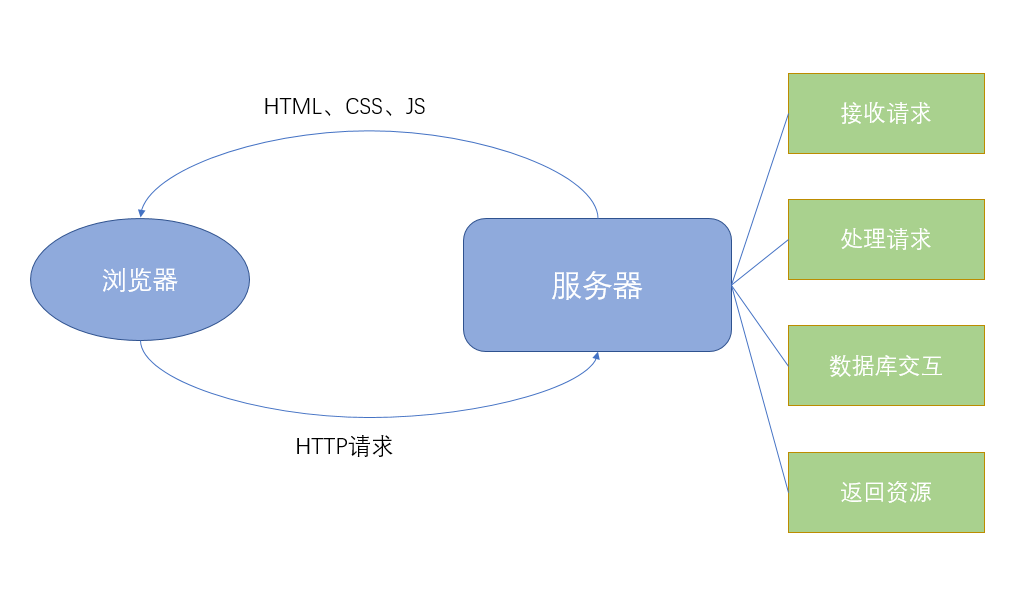


图 1‑3 早期网站服务流程

在这样的模式下，前端工作就只有将UI设计师提供的原型图还原实现成静态页面交付于后端工程师，然后后端人员再加入逻辑代码，使得前后端工作极度耦合，相互依赖严重，一旦设计改变，就需要重新走一遍流程，导致开发效率低，代码难以维护。直到2013年左右，前后端分离思想的出现，基于Node.js服务器，让前端去负责View层和Controller层，后端只负责Model层和Service层，由于Node.js中间层的加入，浏览器不再直接请求服务端的API，而是先去请求Node.js，由Node.js对服务端的API发送HTTP请求，Node.js收到服务端返回的JSON格式数据再去渲染HTML页面[3031]。前后端分离不仅将开发人员的职责明确区分开来，还大大提升了适配性，如果Controller层掌握在后端手里，那么多端适配的时候，后端就要维护不同环境下的页面，导致模板无法重用，而且大多数时候后端的业务逻辑是一样的，如果前后端无法分离，就多出了很多无意义的工作量。

15.WebGL（Web Graphics Library）：WebGL是一种用于Web的标准3D绘图协议，基于OpenGL ES2.0的JavaScript API进行开发。OpenGL（Open Graphics Library）是一种成熟的跨平台高性能3D渲染API，它由Silicon Graphics Inc.开发，然后在 1992年发布，目前由The Khronos Group管理。它是一种基于渲染管线、独立于硬件，且具有客户端-服务器结构化的API[32]。WebGL初始版本是于2011年3月被提出，WebGL2.0的规范发展于2013年并于2017年1月完成。自WebGL问世后，网页应用又可以开拓出更多可能性，例如3D页游，虚拟现实等。

Web技术经过这二三十年来的发展，已经有了天翻地覆的改变，从最初只能制作一个单纯的静态文本页面，到如今可以承载Web OS、AR、VR和人工智能等前沿科技领域的强大技术。截止到2020年底，全球网站数量已经突破十亿，尤其是近十年来，网页数量呈几何级数增长，各式各样的应用都在朝着Web化的方向发展，因为这不仅仅是将应用迁移到Web端，而是思维开始向云计算、云服务、平台化等潮流转变。当底层硬件性能的壁垒不断被打通，Web几乎是未来应用载体的首要选择。

## 本文研究内容及安排

### 本论文的研究内容

随着Web进入3.0时代以后，Web端实时通信、大数据流传输以及WebGL技术的日趋成熟，我们可以看到Web App正以势不可挡的趋势发展，快速占领各个行业，很多基于客户端的程序都在逐渐向Web端扩展。比如：Web Photoshop，AutoCAD Web App、Tim在线文档等产品。而增材制造预处理过程中所用到的软件都是离线的客户端程序，每个流程的数据信息都是独立使用，没有统一的数据存储，对于每一次的处理记录都无法做到数据追踪，并且增材制造预处理过程中的算法也会不断优化更新，而客户端程序的更新要面临多端适配的问题，并且具有版权的算法在客户端程序里也会面临着被破解的风险，而Web化的好处不仅是无感知更新，即开即用等优点，并且还能将计算云服务化，数据云存储共享化，这是未来互联网应用发展的必然趋势。在五六年前Web应用程序的执行效率确实无法超过客户端，但是随着技术的不断发展，曾经的技术瓶颈被一个个打破，浏览器厂商与行业标准在不断进步趋同，因此基于Web的增材制造预处理平台的实现将具有十分重要的意义。

基于以上原因，本课题对Web技术如何应用到增材制造预处理过程进行了研究，主要研究内容有以下几点：

1. 本文设计并实现基于Web的增材制造预处理系统，是一个旨在服务3D打印学习者并对用户产生的数据进行合理管理的平台，是作为一个3D打印软件服务行业的扩展形态而存在。
2. 对WebGL技术和Three.js框架的概念、优缺点及发展现状进行了调研与系统性总结，基于开放的底层Api对系统中模型的展示与交互操作进行二次封装，使得模型交互更加合理，提高用户体验。
3. 针对当前应用给出了合理的技术选型，并完成Web前端、NodeJS后端以及数据库的搭建，并对整个应用架构进行了组合设计，对于系统开发所涉及到的功能模块进行了二次封装，提升整个应用代码的可阅读性。
4. 将增材制造预处理过程中涉及到的几大算法进行研究分析，详细阐述了每个算法的流程，并且根据实际Web应用开发的数据结构，对算法进行了优化调整，并用实际模型对算法进行了测试。
5. 完成了平台原型设计，确定整个系统的界面、功能以及交互方式，实现了用户登录注册、模型上传修改、模型导入导出、模型放缩还原、模型切片、轨迹填充、GCode生成和动画演示等功能，并截取主要代码进行辅助说明。
6. 将应用程序分包部署在服务器上，并在不同设备中测试网页的可使用性，并对整个部署过程做了详细的说明。

### 本论文的结构安排

第一章，绪论。主要介绍本文课题的研究背景与研究意义，3D打印技术的研究现状，Web技术的研究现状。

第二章，增材制造预处理Web平台的关键技术及原理，首先对系统做需求分析，并设计了具体的系统实施方案，然后研究了Web应用的全栈化开发原理与相应的技术栈和数据库选型，最后对增材制造预处理过程中所涉及到的一些关键算法进行了分析和介绍。

第三章，增材制造预处理过程中相关算法在Web端实现，本章通过对STL模型结构的分析，实现了在网页中对STL模型的上传下载以及导入导出的功能。并对预处理过程中所涉及到的拓扑重建算法、切片算法、轨迹填充算法以及GCode生成算法进行了Web端的迁移与测试，并通过关键代码做辅助说明，介绍了在Web上如何对算法进行优化与改进。

第四章，Web应用系统实现与测试，对本系统的各个流程进行了详细的设计，并通过开发环境的搭建展示出基于前后端分离的Web应用系统架构，然后在应用模块对每个流程进行详细的功能设计，最后叙述了如何将Web应用部署于服务器，并进行使用展示。

第五章，总结与展望，概述本文研究的主要内容，提出系统研究过程中遇到的问题和不足，并对基于Web的增材制造预处理平台进行了展望。

# 增材制造预处理Web平台的关键技术及原理

## 项目整体概述

目前市面上的预处理软件都是客户端软件，并且其中核心算法的版权是属于国外开发人员，因此无论是根据实际情况去修改代码，还是出现Bug以后需要更新软件，都需要获取相应的开源资源，这就导致单一的软件无法满足用户的需求，需要将软件组合起来使用。还有不同的用户都拥有不同的本地模型数据，这些数据都存在着丢失的风险，当模型数据到达一定量级时，一些重复的模型也会占用本地存储资源。如果出现一款直接打开网站就能对模型数据进行管理并且预处理流程的算法执行速度与模型展示效果都能满足用户需求的话，那么这将会推进增材制造相关技术云服务化的进程。

鉴于以上几点原因，基于Web的增材制造预处理平台主要完成的任务是让用户可以上传下载并管理需要处理的模型，也可以在平台中选择其他用户的模型进行使用，同时还可以在平台上对模型进行基础的三维展示，拓扑重建，分层切片，轨迹规划以及GCode的生成。该平台适用于有3D打印需求的用户，实验室的科研人员以及普及3D打印技术的教育行业。

在确定需求时，我们主要通过与3D打印客户面谈，以及与相关技术从业人员进行讨论的方式来确定。结合多方观点和现实需求，我们会对整体系统的应用场景，系统模块，细分功能进行设计，以流程图和功能模块图的形式展现，最后与技术人员确定不同功能需要选择的数据结构和相关执行技术，总体上采用原型法的方式进行设计，并使用敏捷开发的方式去推进整个项目。

因此，基于Web的增材制造预处理平台的主要目标为：

1. 用户数据管理。
2. 模型数据管理与共享。
3. 模型展示以及交互动画。
4. 实现增材制造预处理全流程。
5. 模型处理过程中的日志记录。
6. 实时看到当前页面性能。

## 涉及关键技术

### 增材制造预处理相关算法

#### STL模型

立体光造型文件（Stereo Lithographic File，简称STL文件）原本用于立体光刻电脑辅助设计，基本思想是利用离散的微小三角面片来组成各种三维模型的曲面。STL文件格式简单，容易输出，因此许多计算机辅助设计软件都可以输出STL格式文件[33]。STL格式文件被广泛应用与快速成型、3D打印和电脑辅助制造等领域。每个STL文件都是由一组笛卡尔坐标系下无序无规则的三角形顶点和法向量组成的，STL坐标必须是正数，不包含尺度信息，并且计量单位是任意的。如图 2‑1所示为一个STL格式文件的球体。

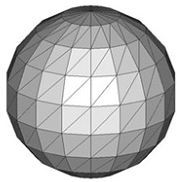


图 2‑1 STL模型

STL文件格式分为两种：一种是ASCII格式，另一种是二进制格式。具体的文件结构如下：

1. ASCII格式：

solid StlFileName // 文件路径及文件名

facet normal nx ny nz // 三角面片法向量的3个分量值

outer loop

vertex x y z // 三角面片第一个顶点坐标

vertex x y z // 三角面片第二个顶点坐标

vertex x y z // 三角面片第三个顶点坐标

end loop

end facet // 完成一个三角面片定义

......// 处理其他三角面片

endsolid StlFileName // 整个STL文件定义结束

1. 二进制格式：

UINT8[80] Header // 使用80个字节存储文件名

UINT32 Number of triangles // 模型的三角面片数量

// 每个三角面片使用50字节存储数据，具体规则如下：

REAL32[3] Normal vector // 每4个字节浮点数存储法线矢量的一个分量坐标

REAL32[3] Vertex1 // 12个字节存储1个顶点坐标

REAL32[3] Vertex2

REAL32[3] Vertex3

UINT16 Attribute byte count end // 2个字节存储三角面片属性

通过对STL文件存储格式的分析，本文以STL文件作为3D打印预处理平台的标准模型文件，并采用WebStorm作为开发平台，利用Three.js中Loader库的STLLoader类进行文件的读取加载，最后使用Three.js提供的api对模型进行绘制和显示。通过对源码的解读，STLLoader的读取流程如下：首先执行load函数通过一个URL访问到服务器端的模型资源，然后将模型文件通过ArrayBuffer的数据流接收到浏览器，之后通过parse函数对数据流进行解析，最后将解析结果交给WebGL内置引擎处理展示。模型读取效果如图 2‑2所示：

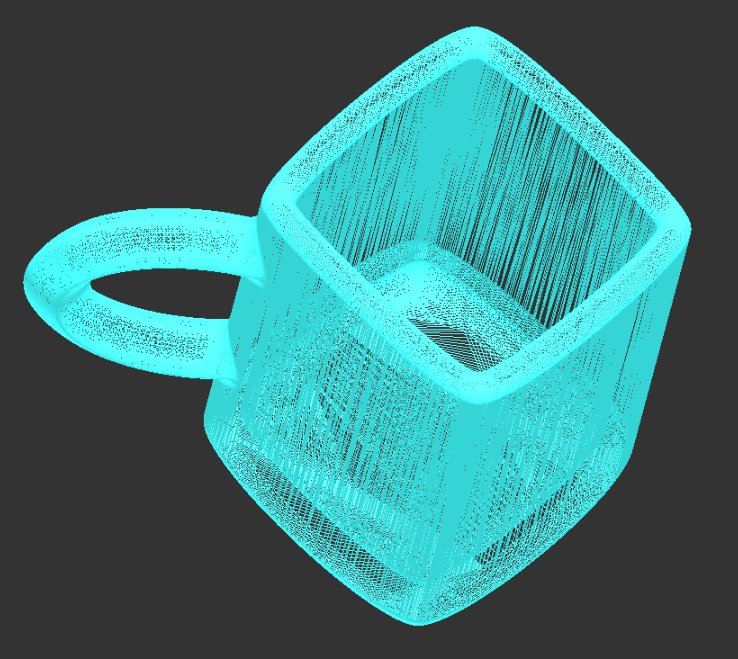


图 2‑2 STL模型读取实现效果图

#### STL模型拓扑重建与冗余去除

在上文叙述的STL模型文件结构中，每个面片结构都包含的各个点的信息，而通常情况下每个顶点都会被多个三角面片所共享，这里面就会导致数据的冗余，将冗余数据进行下一步处理，必然会导致重复计算，浪费内存空间增加计算时间。因此为了解决这个问题，我们需要对原始数据进行拓扑重建以及数据冗余的去除。

下面介绍顶点冗余去除方法[34]：对原始三角面片数组进行循环遍历，在遍历过程中，对每个三角面片顶点进行遍历，每读入一个顶点，首先判断该顶点是否在顶点数据结构中已经存在，如果已经存在，则存储该顶点的索引值到三角面片的数据结构中，否则表示该点为新点，存储进顶点表中。在判断顶点的过程中，我们会发现有些三角面片中点的距离其实很小，也就是说由于精度问题，过于小的三角面片其实是可以去除的。这里我们规定如果两个点，也就是一条线段长度小于一个极小值Min，比如本文设置的阈值是10-5，则就可以将这两个点当做同一个点来处理。其数学判别式如 （式 2.1）所示：

（式 2.1）

其中p1、p2为两个顶点，x,y,z为其在笛卡尔坐标轴上对应的坐标。

在模型拓扑重构过程[35]中，我们需要对三个数据结构进行重建，分别是三角面片(Faces)、三角边(Edges)和顶点(Points)。为了方便后续切片分层以及路径规划处理的需求，数据结构应该满足以下几点特性：

1. 点存储结构记录了点坐标信息以及点索引。
2. 边存储结构记录了边索引、构成边的点索引和每条边的临接面索引信息。
3. 面存储结构包含了组成面的点索引，组成面的边索引以及面本身的访问索引。

具体数据结构定义如图 2‑3所示：

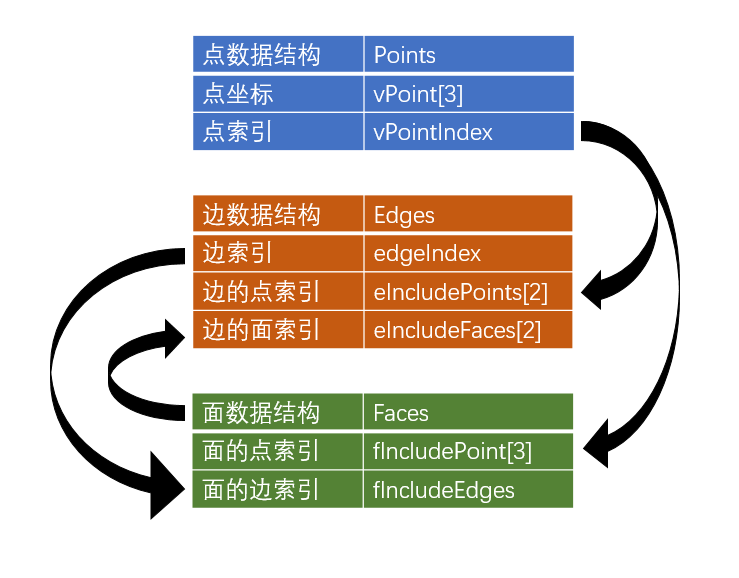


图 2‑3 拓扑重建数据结构

因为我们需要对这些数据进行频繁的查询操作，所以基于散列表的Map结构，也就是键值对集合是最适合用来存放重构后的数据。其中键值对构建映射关系的方法是哈希函数，也可以把这个Map结构看做一个哈希表[36]，哈希函数的选取会直接影响到程序的访问效率。在STL文件中，顶点数据通常都是Float类型，整数部分的位数往往没有小数位数多，且随着模型的增大，整数部分相同的数据也越来越多，因此我们选择的哈希函数要适当地对模型进行放缩处理，避免哈希冲突的情况产生。本文选择的哈希函数如下所示：

式中、、为顶点对应笛卡尔坐标系的坐标分量，为哈希表的长度，通过将顶点坐标放大整数部分，来防止因为整数部分相同导致的哈希地址冲突问题。

明确完数据结构，接下里就是详细的拓扑重建算法过程，如表 2‑1所示：

|  |
| --- |
| 拓扑重建算法流程 |
| 1：声明点、边、面数据结构并初始化；  2：按顺序读入三角面片信息；  3：将三角面片的三个顶点和三边计算哈希值，边的哈希值用临时变量存储起来，点数据则存入点哈希Map中；  4：从临时存储的三边信息中取出一组计算得出每条边的长度，如果小于设定的阈值，则继续4，大于设定的阈值则将边信息存入边哈希Map中，如果边信息读取完毕则进入5，反之继续执行4；  5：如果三边信息都存入了边信息Map中，则将三个顶点的索引和三边索引存入面片数组的点索引与边索引中，并且把当前面片信息存储到边数据结构中的面索引中；  6：判断三角面片读取完成是否为真，为假时返回3；  7：完成拓扑重建。 |

表 2‑1 拓扑重建算法流程

#### STL模型切片算法

STL模型切片就是根据起始高度、终止高度、切片层厚等参数来对网格模型进行平面截取的过程。而在每层处理的时候是通过截平面与处于该高度下的三角面片求交点，再将所求交点顺次连接成一个封闭多边形轮廓。STL模型分层切片示意图如图 2‑4所示：

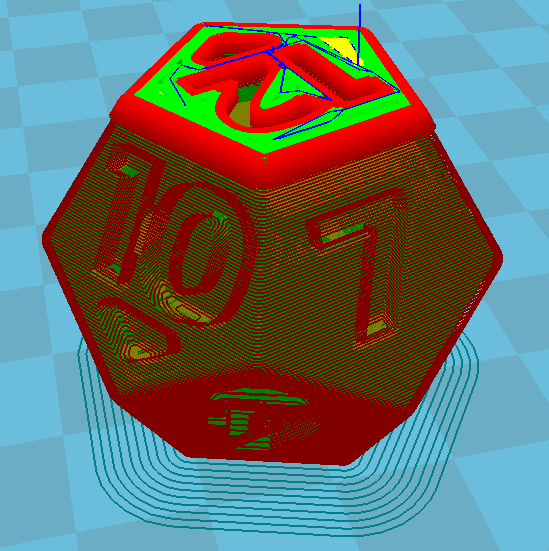


图 2‑4 STL模型分层切片示意图

在已知文件的拓扑结构信息之后，我们做切片去寻找同一高度的点集时，就不用再将点进行排序，而是直接通过拓扑信息的邻接关系顺次将点连线，在三角面片搜索完成的同时也完成了对层的切片轮廓。

本文采用的是等厚分层切片算法，切片前需要知道分层方向、起始分层高度、终止分层高度和层厚这几个参数，从起始高度开始进行切片，先判断高度是否与模型会有交点，如果有交点则进行邻接三角面片搜索，得到该高度下的切片轮廓，再进行下一个高度的搜索直到搜索区间内的高度全部被搜索完毕。基于STL等厚分层切片算法的处理流程如图 2‑5所示：

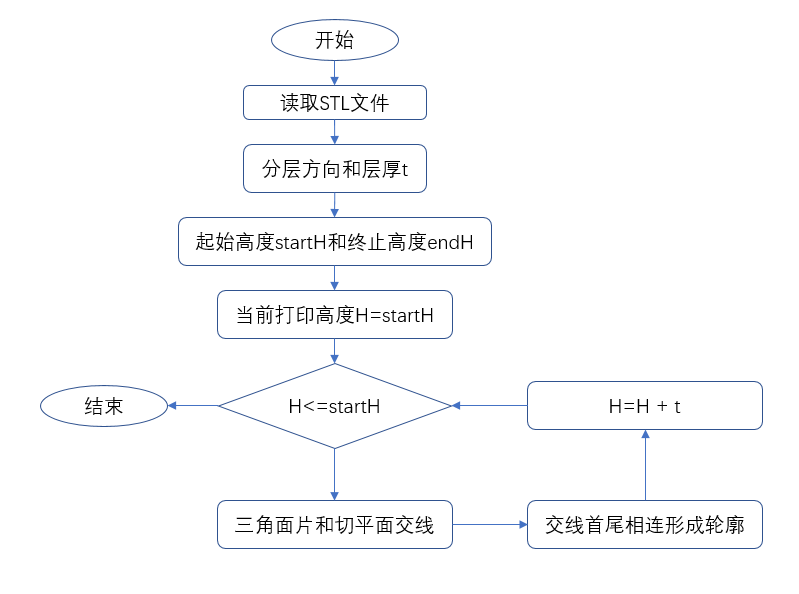


图 2‑5 STL模型等厚分层切片算法流程

在上述算法流程中，找到与切平面有交点的边，求出与这条边的交点后通过提前存储的边结构中的邻接面去找到下一条与切平面相交的点，从而形成切平面与三角面片的交线，以此类推，就可以得到当前高度的封闭二维轮廓线数据。具体算法如表 2‑2所示。

|  |
| --- |
| 基于拓扑信息的切片算法流程 |
| 1：声明一个轮廓线存储数组result，并将提前拓扑构建完成的面数组中的每个数据打上hasSearch的标记，并初始化为FALSE，表示还没有遍历过；  2：从初始高度H开始，任意寻找一个未被搜索过的且包含当前切片高度范围的三角面片，如果有则进入3，并记录起始面片索引startIndex，没有则进入步骤7；  3：对该面片的三条边求交点，如果边与切平面共线则跳过该边，继续对其他边进行求交点；  4：如果总共得到一个交点则将该三角面片的hasSearch设置为TRUE，如果有两个不同的交点，则将其存放进一个临时数组temp[2]中，数组分别是两个点的信息，同时将数组push进result数组中，然后将该三角面片的hasSearch设置为TRUE；  5：将4中temp数组的最后一个点所在的边中的邻接面找到，并进入步骤3，直至该邻接面的索引为startIndex；  6：将高度H加上层厚t，继续2，直到H大于终止高度；  7：完成对文件的切片。 |

表 2‑2 基于拓扑信息的切片算法

#### 轨迹规划算法

等厚分层切片轨迹轮廓完成后，我们将要对封闭的轮廓线区域进行填充路径生成，通过用户设置的线宽，填充密度等参数去进行合理的路径规划。路径主要分为轮廓路径和填充路径两种，比较直观的区别就是轮廓路径填充打印机的每次路径的起点就是终点，因为轮廓路径填充只是将轮廓进行了等距向内或向外的偏置，不断沿着偏置的轨迹打印，直至填充满轮廓内部区域；而路径填充算法则是将特殊的线段按照一定的规律对内部区域进行扫描，所以路径可以为任意位置，每次打印完该线段后的位置跟下一个线段的起始位置都可能不同。

本文选择的是基于填充路径的扫描线多边形填充算法，基本原理是用水平线对轮廓进行扫描求交（由上到下），然后将交点进行排序输出，即完成填充工作。具体示意图如图 2‑6所示：

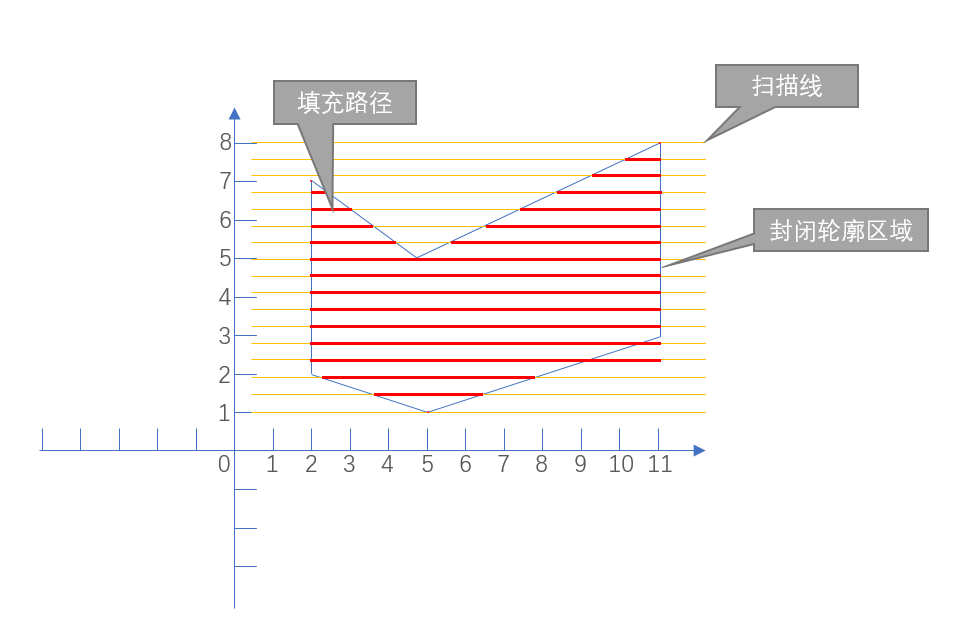


图 2‑6 扫描线多边形填充示意图

因为对于复杂轮廓或者模型中间有孔洞的三维模型，切片截面内部存在非打印区域，会形成内外轮廓[37]。在执行扫描线多边形填充算法前还需要对复杂轮廓进行内外轮廓判定，确定出需要被填充的区域。多轮廓图形的区域几何关系通常是包含与分离，我们区分内外轮廓的方法一般为：首先计算出每个轮廓四个方向的最值，即xMin、xMax、yMin、yMax，再根据这四个值的关系得出轮廓之间的位置关系，给每个轮廓初始化一个标记值等于0，再两两进行对比，如果一个轮廓被另一个轮廓包含，则给被包含轮廓的标记值加1，也就是记录该轮廓被包含的次数。由几何关系我们可以得知，当轮廓的标记值为奇数的时候，该轮廓为内轮廓；如果标记值为偶数，那么该轮廓为外轮廓。根据这个算法，我们就可以很快的得出每个轮廓的内外轮廓关系，只有内外轮廓间的区域需要进行填充路径规划。

根据上述算法我们可以划分出多轮廓的填充区域，对于一些复杂模型的内外轮廓区分如图 2‑7所示，图中的绿色线条表示外轮廓线，红色线条表示内轮廓线，蓝色线条表示需要轨迹填充的区域。

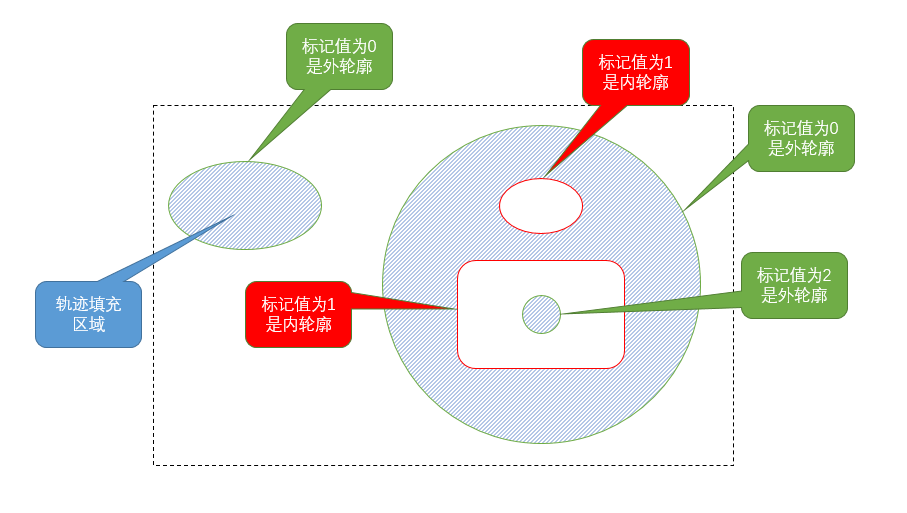


图 2‑7 复杂模型内外轮廓示意图

#### GCode生成算法

打印路径确定后，我们数据是按照Three.js进行绘制的数据格式存储的，而要让打印机执行打印指令，还需要将计算出来的路径转化为3D打印机可识别的电路代码，而不同的打印机有着不同型号的运动控制器，因此必须转化为一种都遵循的标准代码，也就是GCode。GCode原本是用来控制数控机床的加工模型的一种语言，比如控制机床的切削工具按照指定的路径对零件进行切削剪裁，形成所需的零件[38-40]。由于GCode的结构清晰，规则完善简易，而且代码的可读性也很高，用户可以很方便的观察到加工路径的位置坐标，所以我们使用GCode作为3D打印运动控制器的控制代码。

GCode代码的格式由一个英文字母（A-Z）加一串数字（0-9）组成，字母G开头的指令是用来控制打印机喷头运动，字母M开头的指令是一些辅助命令，字母X，Y开头的指令是用来控制喷头在X轴、Y轴上运动位置的增减，字母E开头的命令代表着喷头出丝量，字母F开头的指令表示喷头移速。常用G代码指令含义如表 2‑3所示：

|  |  |
| --- | --- |
| 字段 | 含义 |
| Gddd | 控制喷头运动 |
| Mddd | 辅助命令 |
| Tddd | 选择哪种打印头 |
| Sddd | 是否检查限位开关 |
| Pddd | 命令参数，例如时间 |
| Xddd | 坐标点的X轴位置 |
| Yddd | 坐标点的Y轴位置 |
| Zddd | 坐标点的Z轴位置 |
| Eddd | 喷头出丝的挤出量 |
| Fddd | 打印喷头移动速度 |
| Rddd | 温度相关参数 |
| Qddd | 目前未使用参数 |
| Nddd | 行号 |
| \*ddd | 校验码，检查通讯错误 |
| Iddd | 目前未使用参数 |
| Jddd | 目前未使用参数 |

表 2‑3 常用G代码指令含义

在打印机读取GCode命令前，我们需要对打印机进行初始化：喷头位置归零、对打印材料进行加热融化、加热底部平台、抬起打印喷头、喷头出丝、打开制冷风扇冷却路径。每层打印开始前，我们要将喷头的位置移动至该层高度的Z坐标处，根据路径数据，每个点都是一行GCode指令，指令里包含了喷头移动速度、喷出材料的长度和宽度、坐标点的位置等，喷头的行进速度是可以根据需要调整的，空行程的代码为G0，否则为G1。当前层打印结束后，关闭加热装置，打印喷头回到原点。

GCode代码中我们需要关注的就是控制运动的G代码和M代码，为了实现路径向G代码的转换，我们需要对部分G代码和M代码进行了解，常用代码定义如表 2‑4所示：

|  |  |
| --- | --- |
| 代码 | 含义 |
| G0 | 快速直线运动 |
| G1 | 控制直线运动 |
| G2 | 顺时针圆弧运动 |
| G3 | 逆时针圆弧运动 |
| G4 | 暂停运动 |
| G28 | 归零 |
| G91 | 定义当前位置 |
| M0 | 停止 |
| M1 | 睡眠 |
| M23 | 选择GCode文件 |
| M33 | 获取GCode文件完整路径 |
| M104 | 设置打印机喷头温度 |
| M114 | 输出当前位置 |
| M251 | 保存当前Z轴高度 |

表 2‑4 GCode常用代码含义

### Web应用开发相关技术

Web应用开发技术栈经过这几年的发展，可以说是百家争鸣，在基于前后端分离的模式下，主流前端框架有Angular、React和Vue这三种，服务端主要有Java、PHP、Golang、Python和NodeJS，数据库的选择就更多了，例如MySQL、Oracle、Redis、MongoDB等。鉴于我们系统的计算模块使用的都是本地用户的计算资源，并且模型数据的结构是JSON格式的文档流数据，所以我们选择的是一个轻量型架构，并且为了方便代码编写，减少学习成本，我们选择编程语言统一的框架，因此我们是基于VUE+Ant Design Vue+Three.js+Express.js+MongoDB来对系统进行开发。

#### VUE框架

Vue[41]是一套用于构建用户界面的渐进式框架，Vue设计的核心是让用户只关心视图层，相较与其他大型框架，不仅易于上手，还便于与第三方库进行整合。Vue最大的特点有四个：MVVM设计模式、虚拟DOM、组件化开发、服务器单独部署。

1. 前端MVVM

MVVM模式是从MVC设计模式[42]演变而成，MVC设计模式如图 2.8所示,分为Model（数据模型层）、View（视图层）、Controller（控制层）。在前后端未分离时，开发是基于JSP（JavaServer Pages），其处理流程为：①客户端向服务器发起HTTP请求。②服务端根据请求的URL去执行内部的业务逻辑。③服务端将业务代码执行的结果和静态页面相结合生成HTML模板并返回给客户端。④客户端浏览器解析HTML文件，并将数据渲染到网页上。服务器遵循MVC的设计模式，其中M表示服务器中设计好的输入输出数据结构，C表示接收和发出各类业务数据，V表示将数据结构渲染为HTML模板。而VUE所依赖的MVVM模式[43]如图 2.9所示，MVVM与MVC最大的区别就是：它实现了View和Model的自动同步，也就是当Model的属性改变时，我们不用再自己手动操作Dom元素，来改变View的显示，而是改变属性后该属性对应View层会自动改变。这极大地方便了开发者对DOM的操作，提升了开发者的工作效率。

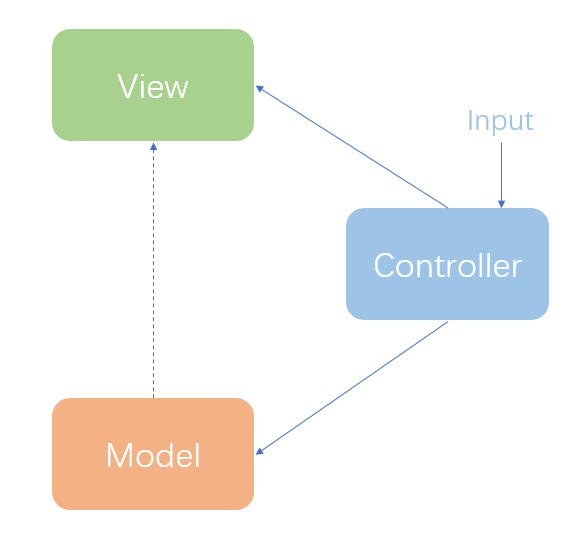


图 2‑8 MVC模式

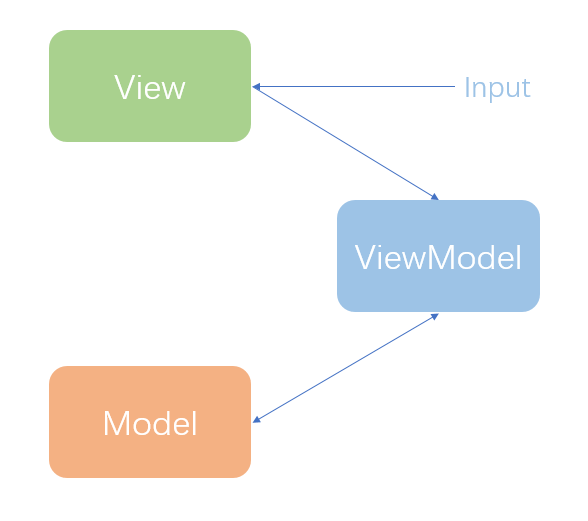


图 2‑9 MVVM模式

1. 虚拟DOM

Vue视图渲染是过程使用的是虚拟DOM的技术，浏览器渲染引擎工作流程大致分为5步：创建DOM树，创建StyleRules，创建Render树，布局Layout，绘制Painting。我们传统的开发模式，当页面的DOM节点变动后，浏览器会从创建DOM树开始从头渲染，因此每个微小的变化都会导致页面重刷新，因此计算代价就十分昂贵。而虚拟DOM技术则是将页面的多次变化内容保存到本地的JS对象当中，再根据diff算法去构建新的DOM树，最终将这个对象一次性挂载到真实DOM树上，避免了大量的重复计算，提升用户体验。

1. 组件化开发

Vue的组件化开发，支持将小型、独立和通常可复用的组件拿来构建大型应用，对组件成员都提供了相应的管理机制，方便开发者进行注册或实例化，比如通常一个应用会以一颗嵌套的组件树的形式来组织，如图 2.10所示：



图 2‑10 应用的组件化形式

1. 服务器单独部署

在应用开发阶段，Vue项目是在Node.js的环境下进行开发的，使用了NPM、Webpack为工具来部署Web服务，辅助开发人员对代码进行调试，例如：①Vue应用在开发中，代码做了任何修改都能实时显示到Web服务中，并且基于NodeJS的服务具备反向代理功能，能够将网页向后台发送的AJAX请求转发到后端服务器。②基于NodeJS的后端Mock也能模拟后端响应HTTP请求，返回测试JSON数据，已达到模拟规范数据进行独立开发的目的。

而实际生产阶段，则需要将项目代码编译打包成静态的HTML、JavaScript以及CSS文件，然后部署到Nginx或者Apache服务器上完成前端应用部署。Vue前端开发体系，因为是基于前后端分离模式，所以无论后端采用何种技术框架，只要双方提供约定好的Restful风格的API即可完成数据的交互。

#### Ant Design of Vue

Ant Design of Vue是基于Ant Design设计体系的Vue UI组件库，开发和服务于企业级产品。由阿里巴巴公司的蚂蚁金服团队开发并开源，包含了Web应用常见的组件库，主要有以下三大特点：一是提炼自企业级中后台产品的交互语言和视觉风格，具有较为良好的用户体验；二是开箱即用的高质量Vue组件，省去开发者大量重复造轮子的时间；三是共享Ant Design of React设计工具体系，降低开发者学习成本。

#### Three.js

在Web端进行三维绘图，肯定离不开WebGL技术，该技术标准基于JavaScript和OpenGL ES2.0，它的特点就是不需要配置额外的绘图渲染插件比如Flash，只需要浏览器环境就能操作复杂的三维结构和3D游戏。一般网页主要是使用HTML、JavaScript以及CSS进行一些动态效果的呈现，比如使用CSS3绘制一些页面元素的动态过渡效果。而WebGL则是一种更为复杂的网页展示技术，借助了系统显卡来对图形数据进行加速处理[44]。

本文使用到的Three.js是一个Github的开源项目，是目前在Web应用用来处理3D程序的技术中生态最为庞大的项目。Web前端开发人员如果直接使用WebGL规范提供的API进行编程，就需要开发人员掌握很多数学知识、图形学知识才能完成3D编程任务，并且基础操作的编码量巨大，而Three.js则是对这些基础API做了二次封装，可以让用户按照一定的规律去绘制各种复杂的图形，并且提供很多对象交互接口和多种动画生成方法。大大地降低了三维模型处理程序上手开发的难度。

三维图形处理跟二维平面图像元素处理方式差别较大，因此在使用Three.js前需要掌握一些3D编程的基本概念，主要包括以下几个基本要素：场景、相机、渲染器。Three.js程序结构如图 2.11所示，其中场景就是一个虚拟三维空间，承载所有物体的容器；相机则是控制视线的位置、方向，角度，相机内的画面就是我们在编程区域所能看到的内容；渲染器就是代表着渲染的结果应该绘制在页面的哪个元素上，并且用什么方式来进行绘制。

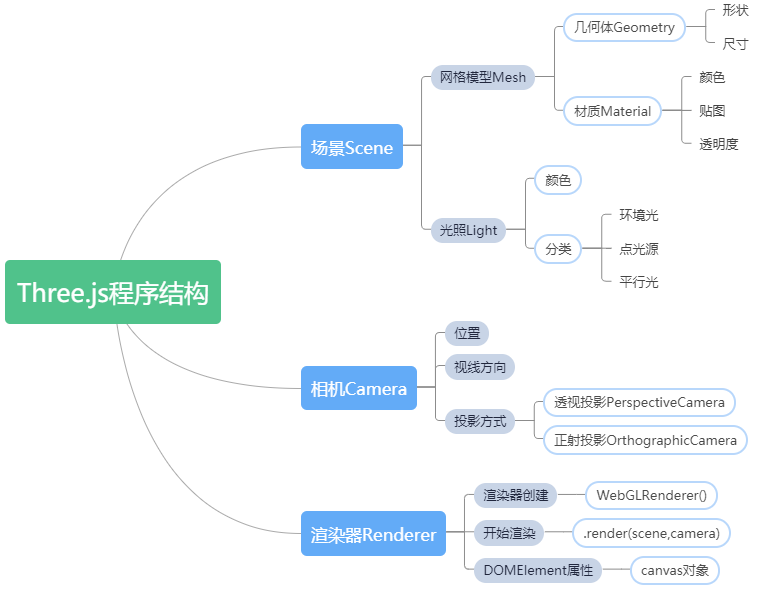


图 2‑11 Three.js程序结构

#### Express.js

Express.js是一个基于Node.js平台的快速、开放、极简的Web服务开发框架[46]。Node.js是在2009年由Ryan Dahl开发的，最初始于他的一个项目，该项目集成了Google V8 JavaScript引擎、事件循环和底层I/O应用编程接口的平台[45]。Node.js具有一下三大特点：①单线程，NodeJS服务不会为每个连接创建一个新的线程，而是只使用一个线程，当有用户连接，就触发一个内部事件，通过非阻塞I/O、事件驱动机制在宏观上模拟并行机制。②非阻塞I/O，比如我们在访问数据库时，传统的单线程处理机制会在执行访问数据库代码后暂停整个线程，直到数据库返回结果，才能继续执行后续代码。而非阻塞I/O机制则是将数据库返回结果后的处理代码放在回调函数中，保证主线程的代码继续执行。③事件驱动，NodeJS中当用户建立请求连接，提交数据等操作时，会触发相应事件，而在每一个时刻，只能执行一个事件的回调函数，但是在执行事件回调的过程中，还可以转去处理其他事件，然后返回继续执行原事件的回调函数，这种处理机制，也被叫做“事件环”机制，事件驱动模式如图 2.12所示。

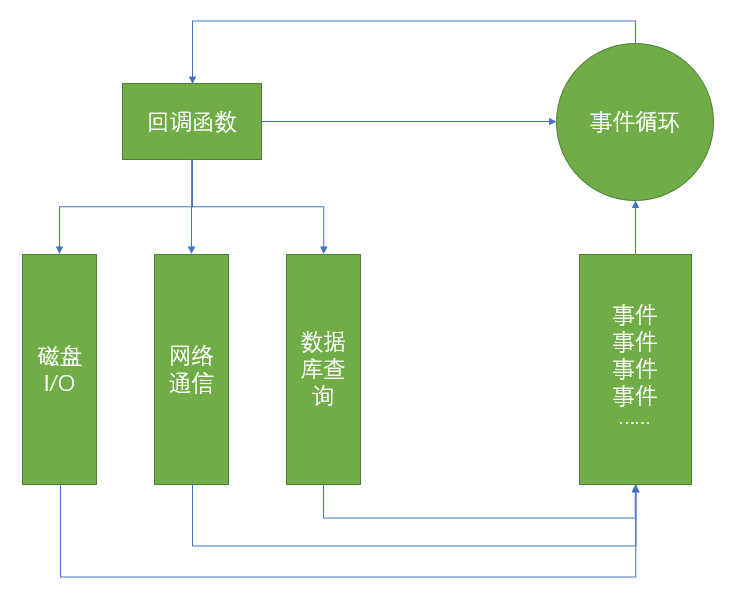


图 2‑12 事件驱动模式

前文已经介绍了Node.js，而在本项目中我们使用Express.js去创建一个可维护的Web服务端应用程序，它提供了强大的API，可以有效的处理路由、HTTP请求、静态文件等，相当于是一个轻量级的Java后台的作用，因为使用的是JavaScript进行编写，所以对于开发者而言，也降低了上手难度，不用去学习多种语言，就可以搭建一套属于自己的后端请求接口服务系统。

#### MongoDB

随着Web2.0的兴起，非关系型数据库[47]成了热门的研究领域。因为传统的关系型数据库在面对大规模用户、海量数据以及高并发的SNS（Social Networking Service）实时动态网站时，会产生许多问题：①面对高并发需求会出现性能瓶颈[48]，比如微博这种大型SNS网站，同时在线用户很可能会达到百万，那么数据库就会出现高并发负载，经常会达到上美秒万次请求。传统关系型数据库在面对每秒上万次查询还能承受，但是面对上万次数据库的读写请求时，磁盘的I/O将无法支撑。②对于海量数据无法高效存储和访问，比如一个用户数据里面订阅了多个栏目，每个栏目里面又包含了不同种类的刊物，每个刊物里面又关联了作者，此时需要查阅该用户下有多少个服务的作者，关系型数据库通常会分库分表切分数据，但是一旦遇到高并发请求，查询效率会变得特别低下，并且增加了后期数据库维护和迁移的难度。③关系型数据库具有ACID[49]特性，可是大部分网站中，很多数据操作都无法严格满足事务的特性，因此高负载下的数据一致性难以保证。

而非关系型数据库（Nosql）慢慢成为主流，从本质上两者区别在于数据结构，非关系型数据库通常使用的数据结构是键值式和文档式。都有着以下几个特点：非关系型、分布式、高扩展性、读写性能高。本文中因为要对STL模型数据进行存储，而STL模型被导入到Web端时的数据是JSON格式，而且还要与用户进行关联存储，所以文档式的数据库最符合系统需求。MongoDB是最有代表性的文档式非关系型数据库，所以我们选择MongoDB作为本系统的数据库。

MongoDB是一个面向集合（Collection）、模式自由（Schema-Less）、文档型（Document）的数据库。面向集合指的是数据被划分存储在数据集合里面，有点类似关系型数据库的表概念；文档型指的是数据存储在文档中，每个集合可以包含无数个文档，文档本身就是一组键值对，键值对的键可以是任意数据类型，这种格式也被叫做Bson，类似于Json的二进制数据格式，两者都支持内嵌对象和数组，但是Bson有着更加丰富的数据类型；模式自由指的是集合中的文档不一定要遵守相同的格式，只要是数据就都能往里面存储，不用担心数据结构不一致而去分集合。选用MongoDB数据库还有一个最大的优点，它是基于磁盘的数据库，面临海量数据的读写时仍然有高效率的I/O。官方测试结果表明，当数据量大于50GB时，MongoDB要比MySQL快将近10倍。

## 本章小结

本章主要介绍了基于Web的增材制造预处理平台所要用到的关键技术及原理，根据3D打印的过程，介绍了增材制造预处理过程中涉及到的数据结构，详细阐述了STL模型拓扑重建算法，切片算法，轨迹规划算法和GCode生成算法的原理；然后分析了该Web系统所需要的技术栈，从前端Vue框架、前端UI库Ant Design of Vue，到Web3D开发框架Three.js，然后后台服务端框架Express.js以及数据库MongoDB的对比选型。下一章将进行系统需求分析和概要设计。

# 系统需求分析及概要设计

## 需求分析

增材制造数据预处理平台需要给用户提供模型数据的展示和模型处理功能，能让用户在系统里进行模型分层切片，打印轨迹规划，打印过程动画模拟以及记录模型处理日志等操作，此外本系统作为3D打印预处理过程云服务化的探索，我们还需要关注到用户本身的数据管理问题，用户可以登录注册，并且拥有个人的在线模型仓库，这样用户可以将模型数据存放在云服务器上，随时修改模型相关信息或者下载到本地使用，也可以共享给其他用户；此外还需要系统管理员来对所有的用户信息和模型信息进行管理。

本文对3D模型的渲染绘制主要使用Three.js技术来构建画面场景，使用Three.js提供的API绘制算法处理后的图形数据以及对模型进行缩放、平移、旋转等交互操作；针对涉及到的处理算法我们使用JavaScript内置的数据类型来对算法进行复现；前端页面使用Vue框架来进行开发；页面路由控制使用Vue-Router进行配置；前端不同页面之间的共享数据使用Vuex来进行管理；前后端通信的HTTP请求使用Axios进行处理；后端使用Express.js响应接口并同步操作数据库；数据则使用MongoDB数据库来进行存储。

## 系统用户及用例

用例图（Use Case Diagram）描述了用户如何去使用这个系统，是软件需求分析中十分重要的步骤[50,51]。基于Web的增材制造预处理平台主要分为模型预处理平台和后台管理两个子系统，系统用户主要分为普通用户和管理员两类。普通用户在系统里可以完成对模型数据的预处理流程，管理员是负责对整个系统的用户信息和模型信息进行维护。下面对系统的用户进行用例分析，并对每个用例进行详细说明。

1. 系统管理员的用例分析

系统管理员用例图如图 3‑1所示。

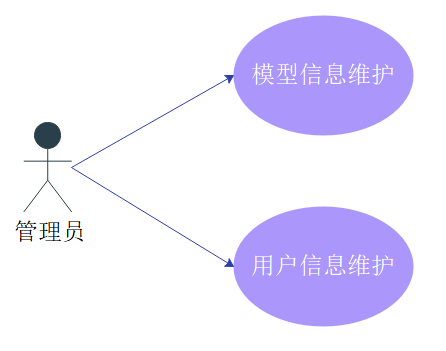


图 3‑1 管理员用例图

系统管理员主要负责模型信息和用户信息的维护，模型信息管理就是可以对模型增加、删除、修改模型附属的一些信息；用户信息管理就是可以增加、删除、修改用户的基本数据。

1. 普通用户的用例分析

普通用户用例图如图 3‑2所示。

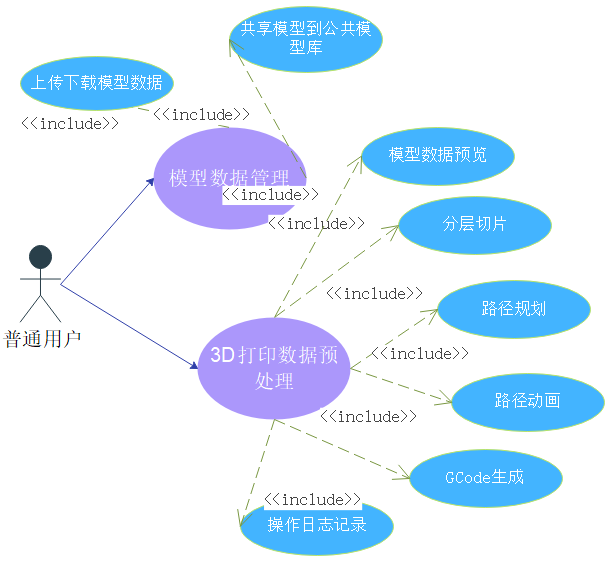


图 3‑2 普通用户用例图

针对普通用户的用例进行分析：①首先将本地的模型数据上传到个人仓库中，并且可以修改模型相关信息，也可以把模型放入公共仓库中。②用户可以在系统里预览模型数据，并提供放缩、旋转、还原和显/隐图层等交互操作。③用户可以对模型数据使用切片分层，轨迹规划，轨迹动画以及生成GCode等功能。④用户可以在日志列表里查看每次处理的一些信息，并可以导出记录。

## 系统业务流程分析

基于Web的增材制造预处理系统的核心流程如下：

1. 注册系统用户，注册完成后登陆系统进入模型管理中心。
2. 用户上传本地模型到个人模型仓库内，并设置模型相关的参数，也可以直接从所有模型库里选择需要的模型放入我的模型库里。
3. 选择一个模型进入工作台，在工作台页面可以对模型进行放缩、回中、旋转、显隐坐标轴、显隐底部参考网格、显隐模型等展示操作。
4. 对模型进行切片处理，并将切片结果渲染到画面上，更新图层数据，同时加入日志记录。
5. 再对模型进行轨迹规划处理，渲染画面，更新图层数据，并把记录加入日志。
6. 同时还能按照轨迹规划的路径生成相应的轨迹打印动画。
7. 最后生成3D打印机能识别的GCode，可以将GCode文件下载到本地。
8. 所有的模型处理操作都记录在了日志面板里。

具体流程如图 3‑3所示：

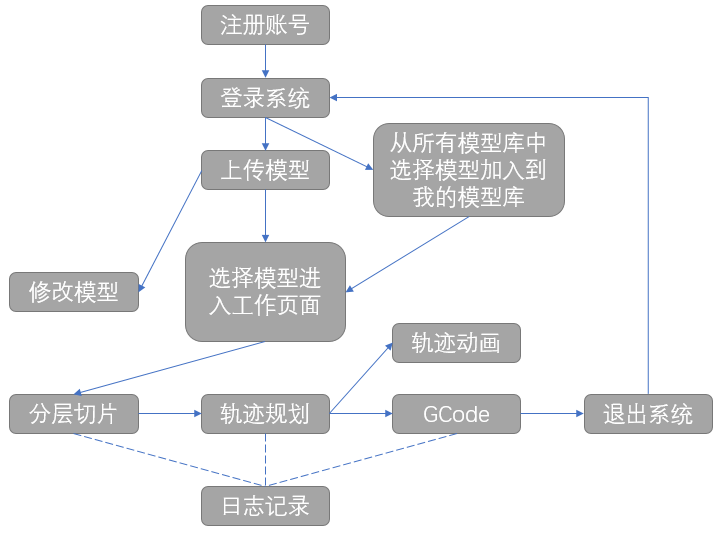


图 3‑3 系统主要使用流程示意图

## 系统详细功能模块设计

### 注册模块

注册模块流程是在注册页面输入用户名、真实姓名、密码三个数据并点击提交按钮，将数据交付于服务器，服务器先对用户名进行查询，如果有重名用户则返回注册失败，否则将数据插入到用户集合当中，并返回注册成功，具体注册流程如图 3‑4所示：

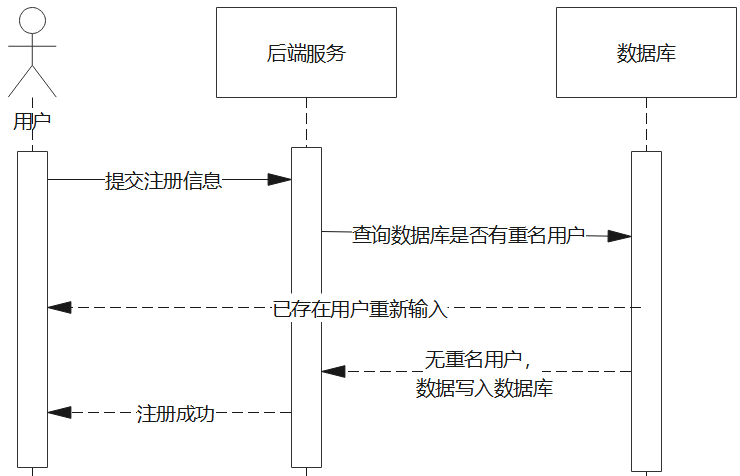


图 3‑4 注册流程图

### 登录模块

登录模块使用了JWT（Json web token）进行校验，具体流程就是在每次登录的时候服务器会根据规范生成一个令牌（Token），本文选择的令牌生成算法是HS256，并且把该令牌放在请求头部返回给客户端，此时用户在之后的请求中都把该令牌带上，这样就可以保证服务器能识别出各个客户端用户的身份。具体验证流程如图 3‑5所示：

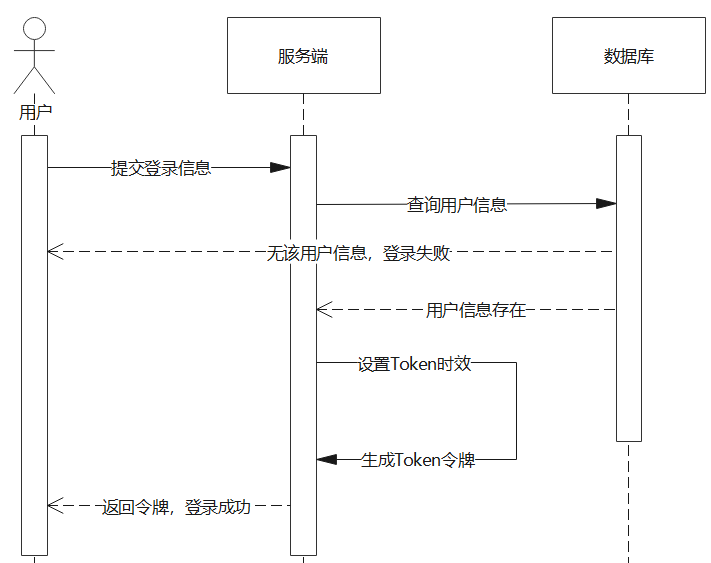


图 3‑5 登录验证流程

### 模型管理模块

模型管理模块分为我的模型库和所有模型库，在我的模型库里面，用户可以上传本地模型文件到我的模型库，在上传的同时需要输入模型名称、模型描述、模型权限、模型图片、模型文件这几个数据，模型上传成功后用户还能对模型数据进行修改和删除操作，在修改模型信息页面还支持模型图片和模型数据的下载功能；所有模型库展示了系统所有用户上传的模型文件，对于公开权限的模型，用户可以直接将模型加入我的模型库，而私有的模型则需要向该用户提出使用申请，如果同意则会自动加入到我的模型库中。模型库管理模块具体功能如图 3‑6所示：

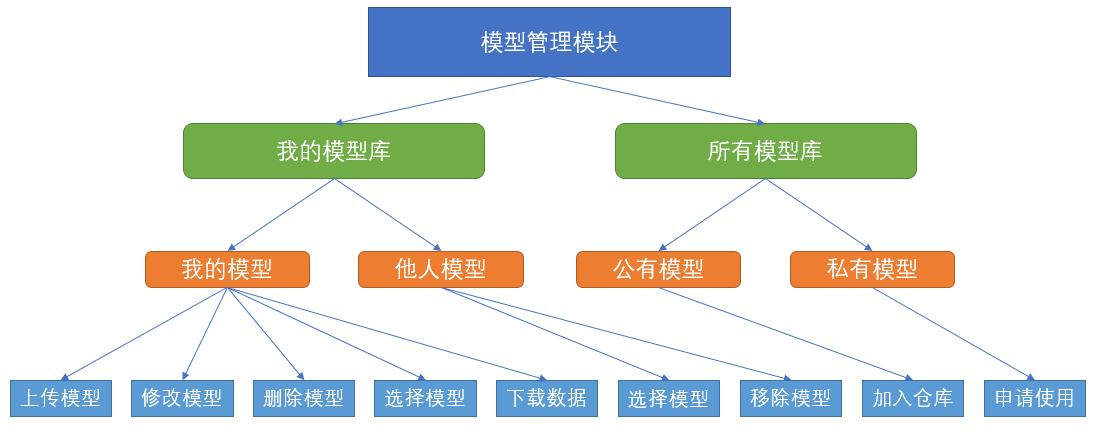


图 3‑6 模型管理模块功能示意图

### 模型显示交互模块

模型展示以及交互操作我们使用的是Three.js这个开源库，它帮助开发者将很多WebGL底层的API进行了二次封装，避免将常规操作进行多次繁琐的组合封装。模型展示与交互部分主要分为基础显示、视窗放缩、视窗回中、图层显/隐控制、算法处理结果、页面性能面板、动画演示这几部分组成，其中图层显/隐控制包含的对象有包络盒、目标模型、底部网格、坐标轴、水平切片、切片轨迹；而算法处理结果则包含了轮廓线信息以及轮廓填充轨迹信息。具体模块关系如图 3‑7所示：

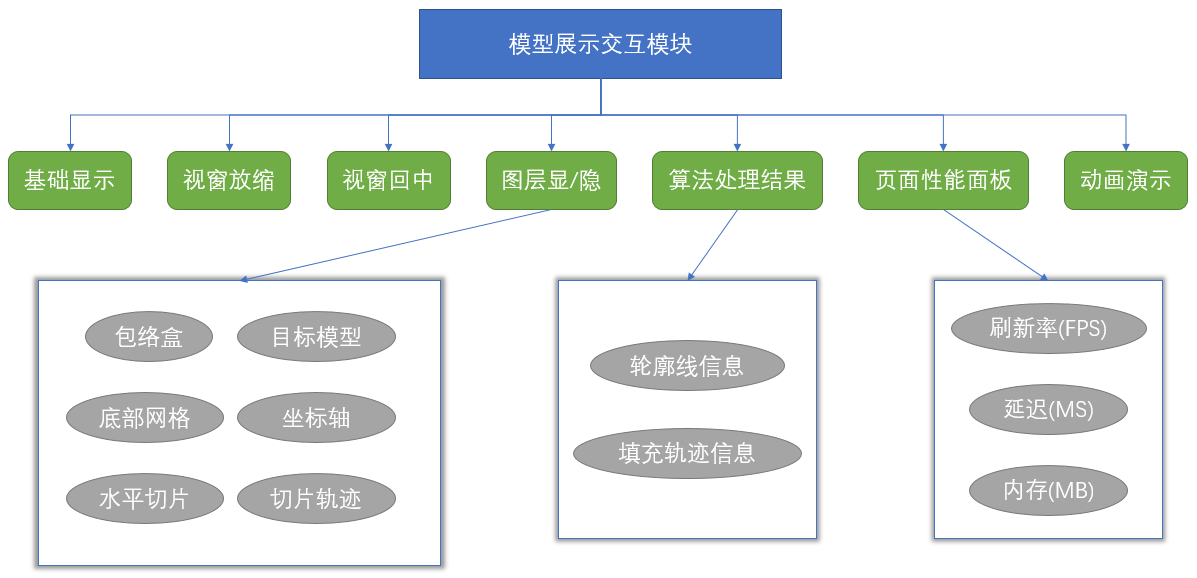


图 3‑7 模型展示交互模块示意图

### 增材制造预处理模块

在第二章我们分析了增材制造预处理过程所需要的几个步骤，首先导入STL模型文件，再对导入的模型进行冗余去除和拓扑重建，再使用重建后的模型数据进行切片生成，然后对每个切片的轮廓进行轨迹填充，最后将轨迹代码转化为打印机可执行的GCode。增材制造预处理的模块设计如图 3‑8所示：

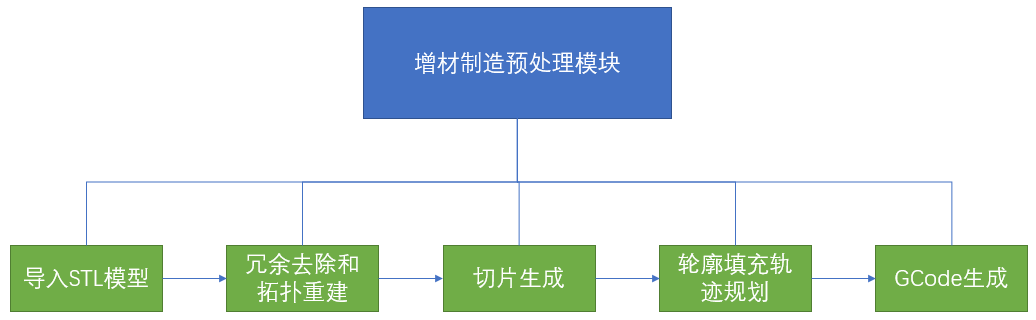


图 3‑8 增材制造预处理流程模块示意图

下面针对每个步骤的数据流向进行详细的分析：

1. 导入STL模型模块，用户在我的模型库页面选择符合条件的模型数据进入工作台页面，然后前端会根据选择的模型访问地址去向服务器发送请求访问服务器上的文件资源，服务器接收到请求后将数据返回给前端，前端接收到服务器返回的二进制流数据，并同步使用Three.js提供的STLLoader处理函数将ArrayBuffer格式的数据解析成方便WebGL渲染的JSON格式数据，流程示意如所示：

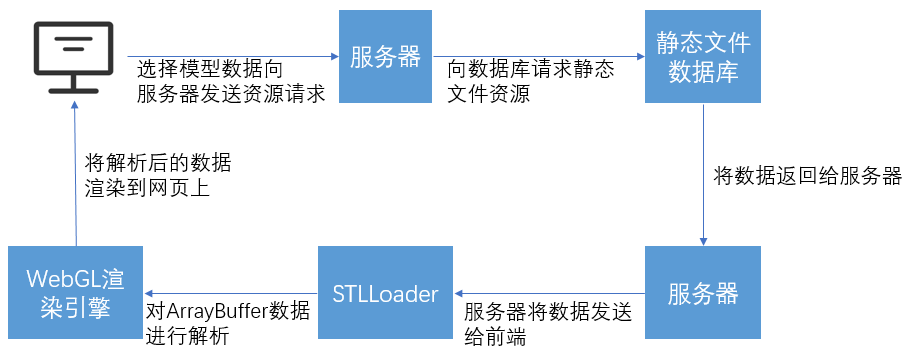


图 3‑9 导入STL模型数据流向示意图

1. 冗余去除和拓扑重建，WebGL引擎渲染的STL模型数据格式是一个个无规律的三角面片，每个面片包含着三个点的坐标以及面片的法向量数据，从这种结构的数据中我们无法得知面片之间的空间拓扑信息，并且当面片的空间涵盖范围远远小于我们所需要的精度值时，这些面片对我们来说就是无意义的，因此需要进行冗余去除和拓扑重建，以便于我们下一步对模型进行切片处理。这两个步骤我们是同步进行的，具体数据处理过程为：首先提前定义三个变量resPoints（Map结构）、resEdges（Map结构）、resFaces（数组结构）分别存储点数据、边数据和面数据，再定义两个哈希生成函数pointHash和edgeHash分别对点和边进行Hash索引值的生成，然后我们开始遍历模型数据，每个面片数据获取完毕后开始计算三个点之间的距离，如果小于设定的阈值T（本文阈值为10-5），则将两个点合并为一个点，例如A点与B点，只将A点存入resPoints内，并把所有B点用A点进行替换，以此类推处理面片的第三个点，如果三个点都大于距离阈值，则再判断三个点的Z轴最大最小高度差是否也大于阈值T，如果满足则将三边与当前面数据存入resEdges和resFaces中，在存储resEdges时除了存储每条边的两个顶点，还有包含边的面片索引，方便后续寻找临接三角面片，不满足则处理下一个面片，直到所有面片被处理完毕。具体处理流程如图 3.10所示。

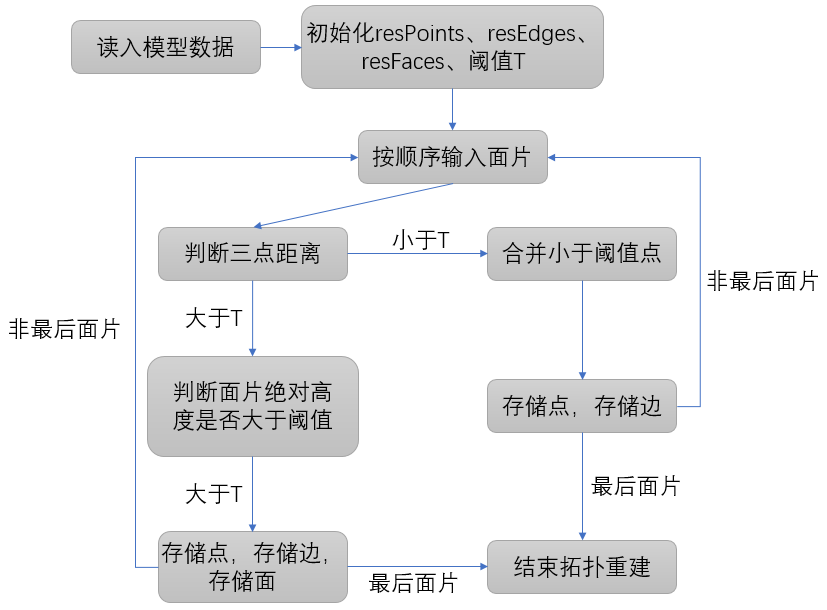


图 3‑10 冗余去除和拓扑重建

1. 分层切片模块，分层切片模块接收的数据有起始切片高度、终止切片高度、层厚、以及切片绘制颜色。进入切片函数后先清除历史切片的数据缓存，再计算分层的背景图层，背景图层为一个范围正好是模型在XY轴平面投影1.5倍的半透明矩形，生成切片矩形的方法为：先通过初始切片高度和终止切片高度算出切片层数，然后循环生成PlaneGeometry对象，设置每个矩形位置再将每个PlaneGeometry实例化为Mesh存放进一个Group中，最后将整个Group加入最大的Scene对象中。生成切片背景图层后，我们要先计算出切片轮廓，计算切片轮廓的方法是以高度进行遍历，在每个高度下从resFaces中任意取一个与该高度相交且未被搜索过的面片，然后初始化轮廓点存储数组resultPoints，存储第一个面片的索引indexFirst，开始对面片中的每条边进行遍历计算交点，交点分为两种情况，如果边的一个顶点就是交点，则直接将顶点存入resultPoints中，否则计算出交点再存入resultPoints中，然后将该面打上已经搜寻过的标记，继续寻找该边的非当前临接面，继续对下一个面进行边遍历，直到下一个面的索引等于indexFirst，则结束当前封闭轮廓计算，然后继续在resFaces中任意取一个符合高度且未被搜索过的面片，直到没有符合条件的面片结束所有轮廓搜寻，具体流程如图 3.11所示。

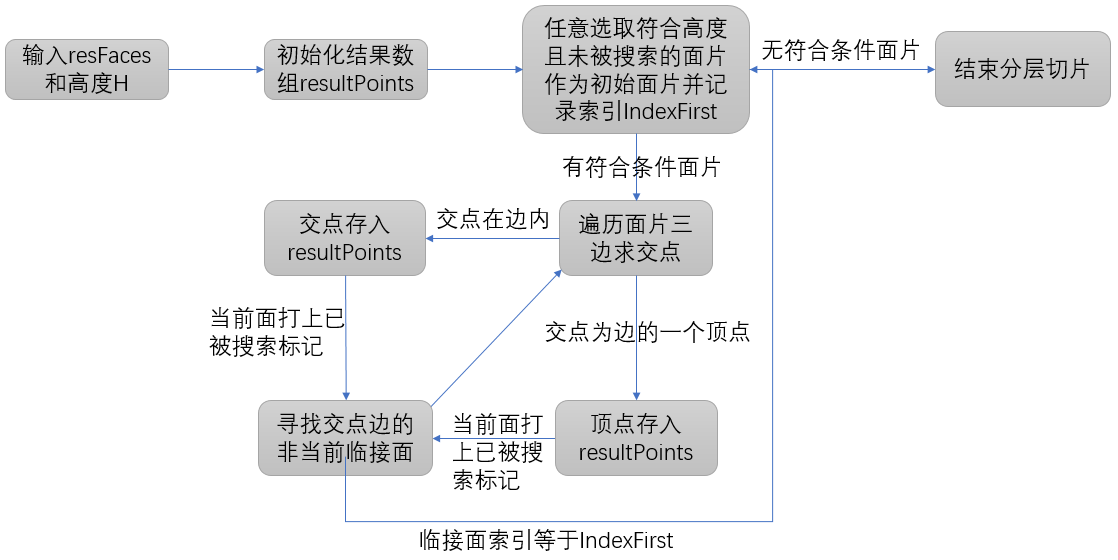


图 3‑11 分层切片实际处理流程

得到了每个轮廓的数据后我们还需要对轮廓进行展示，首先是将每个点进行绘制，绘制流程为：声明一个空几何体对象，再将轮廓坐标点添加到对象当中，再设置对象渲染材质，里面包含颜色和大小参数，然后将对象添加进Points点模型对象中，最后把点模型加入最大的Scene场景中执行渲染。点绘制完毕后还需要将点连接成线，绘制线流程为：将点数据转化为Vectors对象存入listPoints数组里，然后通过BufferGeometry将listPoints转化为缓冲类型几何体，设置渲染材质，然后将对象和材质放入Line线模型中，最后加入Scene场景中执行渲染。切分分层的计算和显示模块总体流程如图 3.12所示。

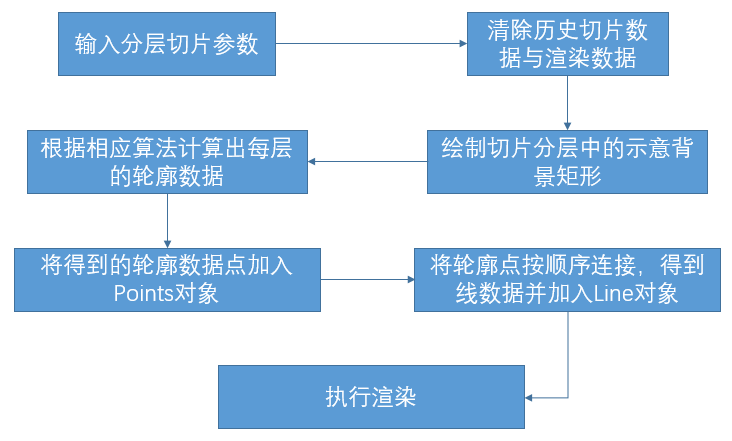


图 3‑12 切片分层计算与显示流程示意图

1. 轨迹填充模块，轨迹填充是依据切片轮廓来对轮廓划分出的区域进行路径规划填充。本文使用的是水平路径填充算法，具体实施过程为：先输入轨迹密度，也就是每条线之间的距离，然后声明pathPoints存储轨迹路径点，然后将轮廓数组进行遍历，对每个轮廓数组重新构建存储模式，新旧轮廓存储格式如图 3‑13所示。



图 3‑13 新旧轮廓数据存储格式

先声明一个二维矩阵distinguishMatrix用来对内外轮廓进行判别，然后初始化contourInfo数组用来存储新表达形式的轮廓数据，里面包含了xMin、xMax、yMin、yMax和edgeInfo参数，代表着每个轮廓的范围以及组成轮廓的边数据，然后先对一个子轮廓数据进行遍历，遍历的过程中就能得到每个轮廓的范围极值和组成的边信息，并存入contourInfo数组中；经过上面步骤我们得到了contourInfo数组，然后使用双层循环遍历contourInfo数组得到内外轮廓判别矩阵distinguishMatrix，在循环中将外层循环的当前轮廓与内层循环的所有轮廓范围进行范围对比，如果当前轮廓有被其他轮廓包含则将判别矩阵对应位置加1并把那个大的轮廓索引值和X轴范围最小值存入判别矩阵，最后得到的distinguishMatrix数据就存放着内外轮廓判别依据。接下来我们要利用distinguishMatrix判别矩阵来对轮廓进行合并操作，开始循环判别矩阵，如果轮廓的判别矩阵对应位置的存储数组长度为偶数则为外轮廓，奇数则为内轮廓，如果是外轮廓则无需处理，是内轮廓则需要寻找到包含它的轮廓中最接近它的轮廓，并将该内轮廓的边数据合并到最接近轮廓的边数据中，同时将该内轮廓的数据从contourInfo中删除，内外轮廓判别过程如图 3‑14所示。

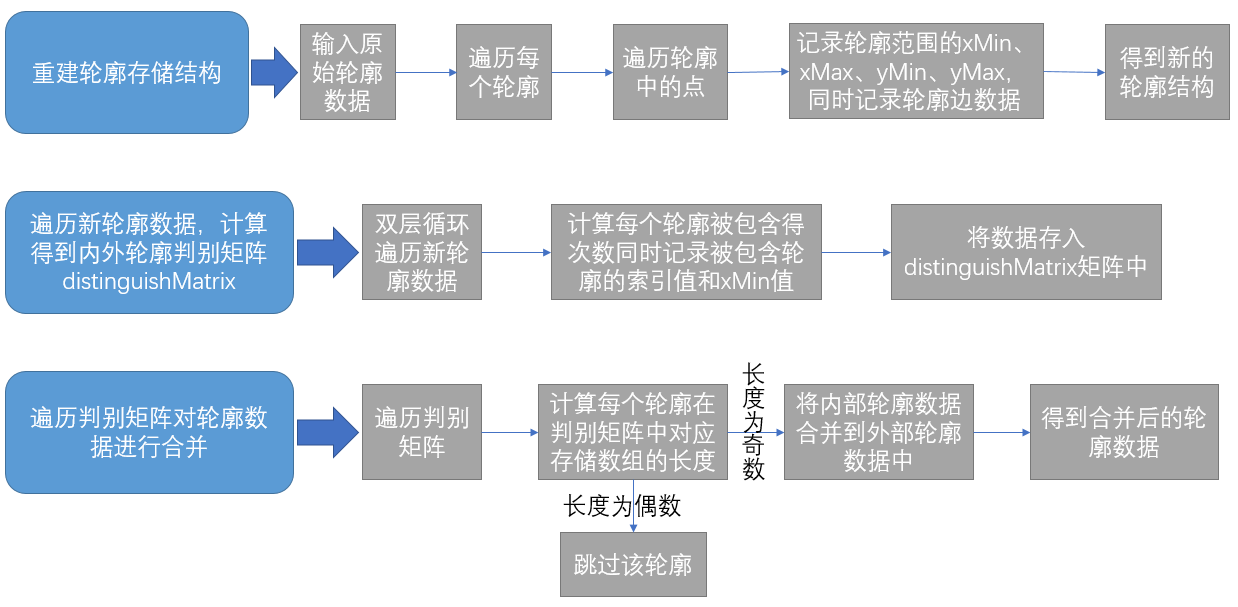


图 3‑14 内外轮廓判别详细过程

当得到处理后的轮廓线数据，我们通过水平线扫描算法就可以得到轨迹规划的路径了。具体实施流程为：初始化扫面线初始高度和截止高度分别为轮廓在Y轴的最大值和最小值，然后遍历每个轮廓区域从初始高度开始向下扫描，以轨迹密度递增，扫描过程中把每个Y轴高度与当前轮廓线求交点，如果当前交点处于轮廓边之间，则将该交点存入交点数组内，如果该交点在两边的最低点则将该交点存入两次交点数组，如果交点位于两边的最高点则跳过该交点，由此得到若干个交点后，按照X轴方向从小到大排序，最后每两个点进行连线（例如ABCDEF这六个点，得到的轨迹就是A-B、C-D、E-F这三条线段）得到最后的轨迹路径； 水平扫描轨迹填充具体流程如图 3‑15所示。

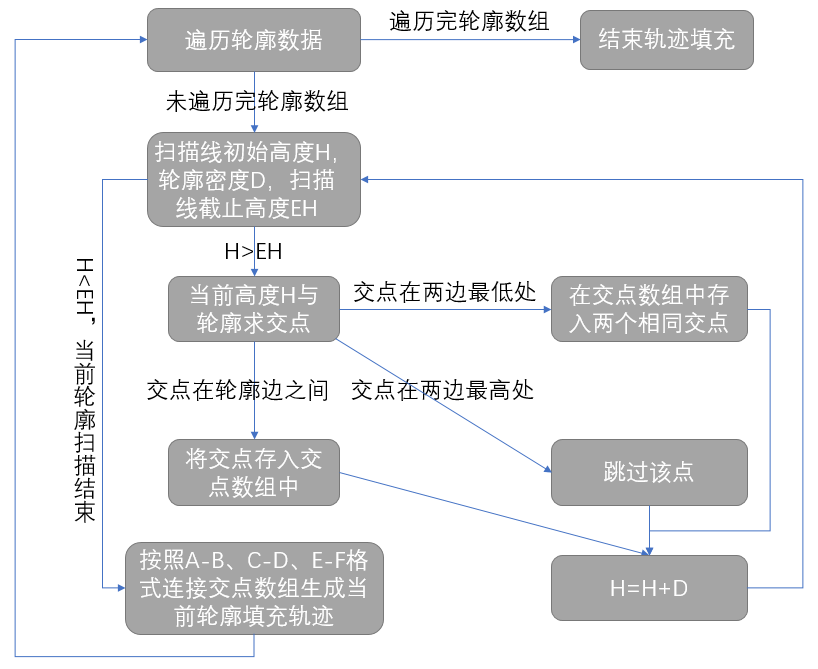


图 3‑15 水平扫描轨迹填充具体流程

1. GCode生成，通常3D打印机使用的GCode文件主要由三部分组成，分别为：初始化部分、打印部分、结尾部分。初始化部分主要是设置一些准备参数，比如复位打印喷头和平台的位置，挤出头和打印平台的预热温度，挤出机计数置零等。初始化部分的具体实例化过程为：设置坐标单位、设置喷头和机床温度、喷头和打印平台还原、挤出长度归零、移动喷头到起始位置。打印部分则是对轨迹路径进行转码显示，用来完成实体打印，需要关注的是打印头的移动速度和喷头送丝量，同时还要根据轨迹的断连控制打印头的升降和送丝的间断。结尾部分的G代码就是完成打印后对打印机进行关闭的操作，比如复位喷头和打印平台，停止加热材料，关闭驱动电机电源等。G代码在不同设备和软件的下的内容结构都有所不同，所以本文中G代码的初始化和结尾部分较为固定，如果有定制化需求，用户可以将G代码自行下载修改。下面分别给出初始化部分、打印部分和结尾部分的简要实例代码。

①初始化部分。

G21; 将单位设置为毫米

G90; 采用绝对坐标

M104 S205; 设置挤出头温度为205℃

G28; 喷头和底部平台回归原点

G1 Z5 F5000 E1; 沿Z轴移动5mm，速度为3000mm/min，并挤出1mm的丝材

M109 S205; 等待喷头温度到达205℃

G92 E0; 打印头丝材挤出量归零

M82; 打印头采用绝对坐标

②打印部分。

G0 X67.263 Y59.881 Z0.500 F7800.000; 打印头以7800mm/min的速度从原点运动到坐标(67.263,59.881,0.500)处，不进行送丝

G1 X68.176 Y59.025 E1 F1080.000; 打印头从上个点以1080mm/min的速度移动到坐标(68.176, 59.025,0.500)处，同时匀速送丝1mm的长度进行打印

G1 X 68.709 Y 58.616 E2 F1080.000; 打印头从上个点以1080mm/min的速度移动到坐标(68.709, 58.616,0.500)处，同时匀速送丝1mm的长度进行打印

③结尾部分。

G92 E0; 打印头丝材挤出量归零

M104 S0; 停止加热打印头

M140 S0; 停止给平台加热

G28 X0 Y0 Z0; 将打印头回归原点

M84; 电机断电

## 本章小结

本章首先介绍了基于Web 的增材制造预处理平台的软件需求，然后根据需求分析将系统用户分为普通用户和管理员两种，并对每个角色进行了详细的用例建模。之后对平台的核心业务流程进行设计概述，然后再对系统进行子功能模块设计，并结合Web开发的特点对每个模块的内部流程进行详细设计。下一章我们将叙述整个系统的实现过程与实验测试结果分析。

# Web应用系统实现与测试

## 应用开发环境

对全文进行全面地总结，并根据各章节归纳出若干有机联系的论点。按正文的内容分段描述，包括本研究“做了什么（提出\*\*新理论/算法、设计或研发\*\*工艺/仪器）、获取什么结果、得出什么结论”。

## 界面设计

### 登录注册页面

### 模型列表页面

### 工作台页面

## 数据库设计

## 服务端设计

## 项目部署

## 系统展示

## 本章小结

# 总结与展望

## 本文主要内容及结论

## 本文的主要创新点

通常情况下，学位论文的创新点应放在最后一章。

创新点要凝炼，表述要清晰明了，如提出了什么创新的思路，主要特点是什么，相比现有理论或技术的提高是什么、或者有什么新的发现，是否具有重要的科学意义或应用前景。既不能过于简单，也不要太细。

硕士学位论文创新点不宜太多，一般为2个左右即可，要注意归纳创新点，千万不要以为越多越好。论文的创新不以创新点的多少来评定的，而以其创新性的价值来评定。几章的工作合在一起凝炼成一个创新点也不是不可以的。

## 展望

。

# 致 谢

。

# 

# 参考文献

武汉光电国家研究中心规定：硕士学位申请人的文献阅读量不少于600篇（高于学校规定的40篇），其中外文文献不得少于2/3；近五年的论文不得少于1/3；绪论部分应对所读文献加以分析和综合。

**参考文献**

1. G. K. Awari et al. Additive Manufacturing and 3D Printing Technology: Principles and Applications[M]. CRC Press, 2021
2. M. Chalfie, S. R. Kain. Green fluorescent protein: properties, applications, and protocols. Hoboken, New Jersey: Wiley-interscience, 1998
3. Tosto Claudio et al. Fused Deposition Modelling (FDM): New Standards for Mechanical Characterization[J]. Macromolecular Symposia, 2021, 395(1)
4. 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(04):1-4.
5. Wohlers Associates, Wohlers Report 2013--Additive manu-facturing and 3D printing state of the Industry Annual WorldwideProgress Report, 2013, USA
6. 陈志茹,夏承东,李龙,等.3D 打印材料[J].金属世界,2018(05):15-18.
7. 谢越. 面向普通用户的三维模型设计方法研究[D].浙江大学,2016.
8. Sutherland I E. Sketch pad a man-machine graphical communication system[C]. Proceedings of the SHARE design automation workshop. ACM. 1964:6-329.
9. Requicha A A, Voelcker H B. Constructive solid geometry[J]. 1977.
10. Requicha A A, Voelcker H B. Solid modeling: Current status and research directions[J]. Computer Graphics and Applications, IEEE, 1983, 3(7):25-37.
11. Requicha A A, Voelcker H B. Boolean operations in solid modeling: Boundary evaluation and merging algorithms[J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(1):30-44.
12. Braid I C. The synthesis of solids bounded by many faces[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(4):209-216.
13. Braid I. On storing and changing shape information[C]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics. Vol 12. ACM. 1978:252-256.
14. Braid I, Hillyard R. Geometric modeling in ALGOL 68[J]. ACM Sigplan Notices, 1977, 12(6):168-174.
15. 阿占文.家庭化3D打印机分层软件的设计与实现[D].华中科技大学, 2014.
16. 丘宏扬,陈松茂,刘斌等.快速成形系统中 STL 文件切片算法的研究[J].锻压技术,2005,30(4):35-39.
17. Neil Savage. Weaving the web[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 20-22.
18. Tabarés Raúl. HTML5 and the evolution of HTML; tracing the origins of digital platforms[J]. Technology in Society, 2021, 65.
19. Aiello M. The Browser Lament[J]. In: The Web Was Done by Amateurs. Springer, Cham, 2018.
20. Claussnitzer, Melina, Cho, Judy H, Collins, Rory, et al. A brief history of human disease genetics[J]. Nature, 2020, 577(7789), 179–189.
21. Stian Reimers, Neil Stewart. Adobe Flash as a medium for online experimentation: A test of reaction time measurement capabilities[J]. 2007, 39(3), 365–370.
22. Jesse James Garrett. Ajax: A new approach to web applications[EB/OL]. 2005, <https://www.adaptivepath.com/publications/essays/archives/000385print.php>.
23. G. Richards, S. Lebresne, B. Burg, and J. Vitek. An analysis of the dynamic behavior of JavaScript programs. In: ACM Sigplan Notices, 2010, vol. 45, no. 6, pp. 1–12.
24. J. Resig and others. jquery: The write less, do more, javascript library. Disponvelem, 2009.
25. 姚雅斐. 软件生态系统的健康性评估[D]. 中国矿业大学, 2020.
26. Tim Hesterberg[J]. Bootstrap, 2011, 3(6), 497–526.
27. 秦梦远, 傅忠传. 基于Chrome调试协议的Chromium浏览器V8引擎漏洞检测方法[J].智能计算机与应用,2020,10(02):320-324.
28. Tilkov S, Vinoski S. Node.js: Using JavaScript to Build High-Performance Network Programs[J]. IEEE Internet Computing, 2010, 14(6):80-83.
29. 陆凌牛. HTML5与CSS3权威指南[M]. 机械工业出版社, 2011:60-100.
30. S Mohorovi ci c. Implementing Responsive Web Design for Enhanced Web Presence[C]. Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), 2013 36th International Convention on IEEE 2013:1206-1210.
31. 杜艳美, 黄晓芳. 面向企业级web应用的前后端分离开发模式及实践[J]. 西南科技大学学报, 2018, v. 33; No.130(02):86-90.
32. Chandler, Jennifer Sara. Techniques for Visualizing Particle-Based Flow Fields[D]. ProQuest Dissertations and Theses Full-text Search Platform, 2016.
33. 侯聪聪,南琳,张磊等.基于分组的STL模型快速切片算法[J].制造业自动化,2014,(9):12-15.
34. 巢海远,刘景,童晶等.一种处理带有边界的非封闭STL模型的切片算法[J].计算机集成制造系统, 2015,21(10):2587-2595.
35. Gan W, Zhou Y H. An improved method of hash table based on transform and conquer[J]. Information and Computational Science, 2012, 9(17): 5361－5371.
36. Hao J B Fang L, Yang H F. An Improved Boundary Extraction Method of STL Model Based on Edge Curvature Estimation[J]. Computer Modeling and New Technologies, 2014, 18(10):252-258.
37. 何泳江.一种工业CT切片直接生成3D打印G代码的方法研究[D].重庆大学,2019.
38. 徐文鹏,王伟明,李航等.面向3D打印体积极小的拓扑优化技术[J].计算机研究与发展,2015,52(1):38-44.
39. 侯章浩,乌日开西·艾依提.3D打印的路径规划研究综述[J].机床与液压,2016,44(5):179-182.
40. 张龙,李旭东,郭德昌等.3D打印过程的计算机仿真[J].计算机仿真,2014,31(8):226-229,300.
41. Freeman A. Extending Vue.js[M]. Pro Vue.js 2. 2018.
42. Yuanyi Chen and Chen Yuanyi. Application of Web Program Development Based on Struts Framework[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1648(3) : 032193-.
43. Kouraklis J. MVVM as design pattern[M]. MVVM in Delphi.Berkeley, CA: Apress,2016:1-12.
44. Nazarov R, Galletly J. Native browser support for 3D rendering and physics using WebGL, HTML5 and JavaScript[C]. Communications of the ACM. 2013.
45. IOANNIS K, KYRIAKOS-IOANNIS D, NIKOLAOS D. Is Node.js a viable option for building modern web applications? A performance evaluation study[J]. Computing, 2015, Vol.97(10): 1023-1044.
46. MCMANUS S. Write Maintainable Web Apps With Express[J]. Net, 2014(Mar.TN.251).
47. 范凯.NoSQL数据库综述[J].程序员,2010(6):76-78.
48. Paolo Atzeni et al. Data modeling in the NoSQL world[J]. Computer Standards & Interfaces, 2020, 67.
49. Sangeeta Gupta. Comparative Analysis of Nosql Specimen with Relational Data Store for Big Data in Cloud[J]. International Journal of Distributed and Cloud Computing, 2015, 3(1):17-23.
50. TVD Maßen, H Lichter. Modeling Variability by UML Use Case Diagrams. in: Proceedings of International Workshop on Requirements Engineering for Product Lines, IEEE Joint International Requirements. Engineering Conference(RE02), Essen, Technical Report: ALR-2002-033, 2002, 19-25.
51. G Booch, J Rumbaugh, Ivar Jacobson. UML 用户指南, 第 2 版. (修订版). 北京:人民邮电出版社, 2013(1): 258-283.