

孔洞自动识别与修复在鞋模修复中的应用

杨亚伦, 荆海杰, 肖红燕

山东华云三维科技有限公司, 山东山大华天软件有限公司, 山东 济南
Email: haoguifang@hoteamsoft.com

收稿日期: 2021年3月29日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

摘要

目前受国家环保力度逐年上升, 传统制鞋行业污染重, 效率低, 加之人员用工成本上升, 企业受到多重压力, 3D打印制鞋行业受到国家环保政策支持, 企业积极转型升级。因此, 未来一段时间是3D制鞋行业发展的黄金时间。3D打印机厂商与大型制鞋生产企业, 对于鞋模修复的需求主要集中在模型质量与效率。针对鞋模制作方式由机加工向3D打印转换过程中, 犀牛等软件设计的模型存在缝隙、孔洞等不可打印问题, 解决困扰制鞋行业技术人员在模型设计转换过程中出现的鞋模模型质量差, 缺陷多, 修复时间长等问题, 提出了一种基于孔洞自动分类识别与修复的方法, 将孔洞按照拓扑关系划分为单孔洞和连续套洞, 根据几何形态划分为缝隙、错位孔洞、环形孔洞、简单孔洞等几类孔洞, 对每一类型的孔洞, 根据其特点, 有针对性地进行修复。对于简单孔洞类型采用这种新的填孔算法, 可以达到自动修复模型孔洞的目的。本文方法可以保证修复后的鞋模拓扑正确、填补孔洞区域曲率连续, 使鞋模最大程度的接近原始模型, 可以为后续3D打印设备提供优质的模型。

关键词

消费级模型, 孔洞修复, 网格孔洞修复, 孔洞识别

Application of Automatic Hole Recognition and Repair in Shoe Mould Repair

Yalun Yang, Haijie Jing, Hongyan Xiao

Shandong Huayun 3D Technology Co., Ltd. Shandong Shanda Huatian Software Co., Ltd., Jinan Shandong
Email: haoguifang@hoteamsoft.com

Received: Mar. 29th, 2021; accepted: Apr. 23rd, 2021; published: Apr. 30th, 2021

Abstract

At present, due to the increasing national environmental protection efforts year by year, the traditional shoe industry is heavily polluted, low efficiency, coupled with the rising labor costs, enterprises are under multiple pressures. The 3D printing shoe industry is supported by the national environmental protection policies, and enterprises are actively transforming and upgrading. Therefore, the future period of time is the golden time for the development of 3D shoe industry. 3D printer manufacturers and large shoe manufacturers mainly focus on model quality and efficiency for shoe mold repair. For mould making shoes from machining to 3D printing process, such as rhino software design model of cracks, holes and other nonprintable problems, solve the shoemaking industry technical staff in design process model in poor quality of shoes mold model, defects, repair the problem such as long time, this paper proposes a method based on hole automatic classification recognition and repair. The holes are divided into single holes and continuous holes according to the topological relationship, and the holes are divided into crack holes, dislocation holes, annular holes and simple holes according to the geometric morphology. The holes of each type are repaired according to their characteristics. For simple hole types, the new hole filling algorithm can be used to automatically repair the holes in the model. The method in this paper can ensure the correct topology of the repaired shoe mold and the continuous curvature of the cavity filling area, so that the shoe mold is as close to the original model as possible, and can provide a high-quality model for the subsequent 3D printing equipment.

Keywords

Consumer Model, Hole Repair, Mesh Hole Repair, Hole Identification

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,中国制鞋业发展迅猛,已成为世界上最大的鞋类生产和出口国。但受人工成本上涨、贸易保护主义以及同质化竞争等因素影响,我国制鞋业也遭遇了前所未有的挑战。

制鞋业是劳动密集型产业,其发展和转移受到土地资源、劳动力成本、原材料供应、环境保护以及销售市场等多方面影响和制约。由于全球主要消费市场和鞋业制造商、批发商及零售商对利润最大化的最求,必定要考虑上述方面的重要因素,使得全球制鞋业的重心在不断转移。早期的全球制鞋业总的中心在欧洲的意大利、西班牙和葡萄牙等国家,上世纪六七十年代开始转移到成本相对低廉的日本、香港和韩国等国家和地区,上世纪80年代末,90年代初,又转移到了土地劳动力成本更低廉、产业资源更丰富、投资环境更完善的中国大陆沿海一带。

随着科技发展,3D打印技术的日趋成熟,在制鞋行业应用越来越广泛,与传统制鞋行业相比,3D打印技术在制鞋效率、质量、成本等方面优势越来越明显。其发展规模呈逐年扩大趋势,但3D打印工艺对3D模型的要求较之以前的传统制造模式更高。

传统制鞋业是使用犀牛软件设计,使用数控加工的方式制作。随着3D打印技术的发展,鞋模制作开始向3D打印方式转变。3D打印具有速度快、周期短、易量产、精度高、环保健康、全方位无死角、

利于款式创新的优点。3D 打印需要 STL 文件必须水密封，而传统数控加工方式下，犀牛等设计的模型存在缝隙、孔洞等不可打印的问题。

2. 概述

2.1. 研究背景

目前受国家环保力度逐年上升，传统制鞋行业污染重，效率低，加之人员用工成本上升，企业受到多重压力，3D 打印制鞋行业受到国家环保政策支持，企业积极转型升级。因此，未来一段时间是 3D 制鞋行业发展的黄金时间。

3D 打印机厂商与大型制鞋生产企业，对于鞋模修复的需求主要集中在模型质量与效率。针对鞋模制作方式由机加工向 3D 打印转换过程中，犀牛等软件设计的模型存在缝隙、孔洞等不可打印问题，解决困扰制鞋行业技术人员在模型设计转换过程中出现的鞋模模型质量差，缺陷多，修复时间长等问题，提出基于孔洞自动分类识别与修复的方法，生成可 3D 打印的模型。

2.2. 国内外研究现状

三角网格模型是一种应用非常广泛的几何模型表达形式，在逆向工程、有限元分析、计算机动画、医学影像三维重建、3D 打印等领域有着非常广泛的应用。在网格模型的获取过程中，往往会产生一些不希望出现的孔洞，这些孔洞的出现一方面影响了模型的外观，另一方面也不利于许多后续处理的进行。在复杂扫描的三角网格模型中，孔洞的识别和修复是模型封装、计算、打印等可用性的基础[1]。

目前，针对三角网格模型的单一孔洞的修复算法主要有三类，一是直接采用原始孔洞点，根据点的相邻边的夹角、法向等逐步构建空间三角形，该类算法实现简单，但由于孔洞的形态可能比较复杂，没有新增三角形内部点，往往不能保持模型的连续性，修复效果不够理想；第二类算法是在第一类算法的基础上，通过边交换、细化三角形等方法，在初始构建的三角面片中新增点，以改善填孔三角形的形态，但由于未考虑相邻区域的连续性和几何形态，在复杂孔洞形态下，也难以获得理想的效果。第三类算法是根据孔洞的点分布，计算特征平面，将孔洞点投影到特征平面上进行分元，然后采用隐式函数、径向基函数等将特征平面上的点映射到三维模型上，该类方法得到的填孔面的形态往往比较理想，但适用场景较为苛刻，在简单孔形态下能够获取理想的效果，但对复杂孔形态可能出现映射失败或者映射错误的情况，导致填孔效果差。

目前在模型修复软件方面，主要的修复软件有比利时的 Magics、Autodesk 公司的 NETFABB、日本 UEL 公司的 POLYGONALmeister。Magics 功能最全，数据质量高，易用性较差；随打印机厂家进入中国，售价昂贵在 9.6~12 万元。NETFABB 功能、操作性一般，且数据质量差。POLYGONALmeister 的 Editor + advanced 模块，易用性、数据质量较好，但是功能少，尚未进入中国市场。三款软件对从业人员要求较高，效率低，是比较通用的模型修复软件。中国制鞋产品设计建模过程不规范，导致出现大量面与面之间小的缝隙、加工方向上开放边形成的各类孔洞。目前市场上没有针对中国制鞋产品设计特点的修复软件。

目前没有专门针对鞋模行业的 3D 打印修复软件，现有的 3D 打印修复软件不能较好的处理鞋模，存在操作性差、数据质量低、效率低等问题。解决困扰制鞋行业技术人员在模型设计转换过程中出现的鞋模质量差，缺陷多，修复时间长等问题。

3. 鞋模修复方案

网格模型是 CAD 系统和 3D 打印系统之间的数据交换模型，CAD 造型生成的实体可能存在一些缺陷，

会影响后续的三角化过程，正确的 CAD 模型也会由于精度等问题生成缺陷导致无法切片打印。

中国制鞋产品设计建模过程不规范，导致出现大量重叠面、交叉面、面与面之间小的缝隙、加工方向上开放边形成的各类孔洞等错误。

针对鞋模设计缺陷提出鞋模修复解决方案。鞋模修复流程如下：

- 1) 解析输入模型的三角网格模型数据，识别模型中的退化三角面片和重复面片，并将退化三角面片和重复三角面片删除，快速建立模型的面与边、边与点之间的拓扑关系。
- 2) 根据面与边之间的连接关系，采用区域生成法计算模型的单连通区域，计算每个单连通区域的边界。
- 3) 删除建模过程中叠加的重复多余面。
- 4) 智能识别局部重叠以及交叉特征的面，基于离散几何数据进行自动分割处理，自动判断内外，删除内部部分。
- 5) 几何形状堆叠形成大量的内部遮挡面，进行裁剪、被裁减、圆周法向裁剪，处理内部遮挡面错误。
- 6) 孔洞自动分类识别，分别进行填补，得到可 3D 打印的模型。

本章节主要就重复面与局部重叠的处理进行详细介绍。

3.1. 重复面错误处理

删除建模过程中叠加的重复多余面的具体方法为：图 1。

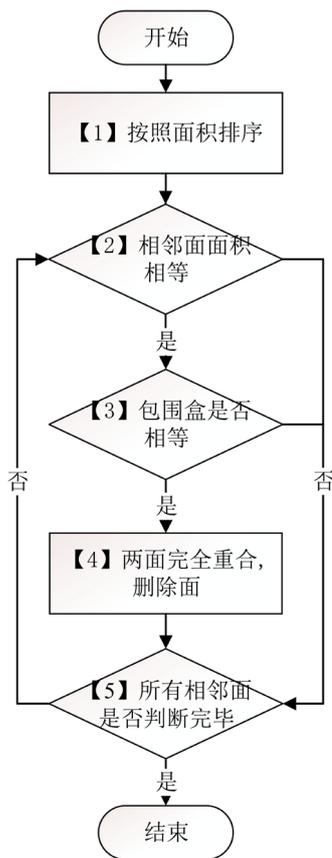


Figure 1. Flow chart of repeated surface deduplication

图 1. 重复面去重流程图

- 【1】将所有输入部件按照面积进行排序。
 【2】判断相邻部件的面积是否相等，是执行【3】，否执行【5】。
 【3】判断两个部件包围盒是否相等，是执行【4】，否执行【5】。
 【4】两部件完全重合，删除重复面。
 【5】所有相邻面是否判断完毕，是命令结束，否执行【2】。

3.2. 局部重叠和交叉处理

局部重叠和交叉特征识别的方法为：若两个面包围盒不相交，则认为两个面不具有局部重叠与交叉特征，若包围盒相交，进一步判断两个面是否相交，若不相交则认为两个面不具有局部重叠与交叉特征，若相交，根据精确几何边界数据，判断小的边界是否在大的边界的内部，若在内部，则认为两个面局部重叠，去掉小的面。若不在内部，将其中一条边界离散，将离散点向另一条边界的折线段进行投影，判断投影点是否在折线段上，

局部重叠和交叉特征的识别流程如图2所示。

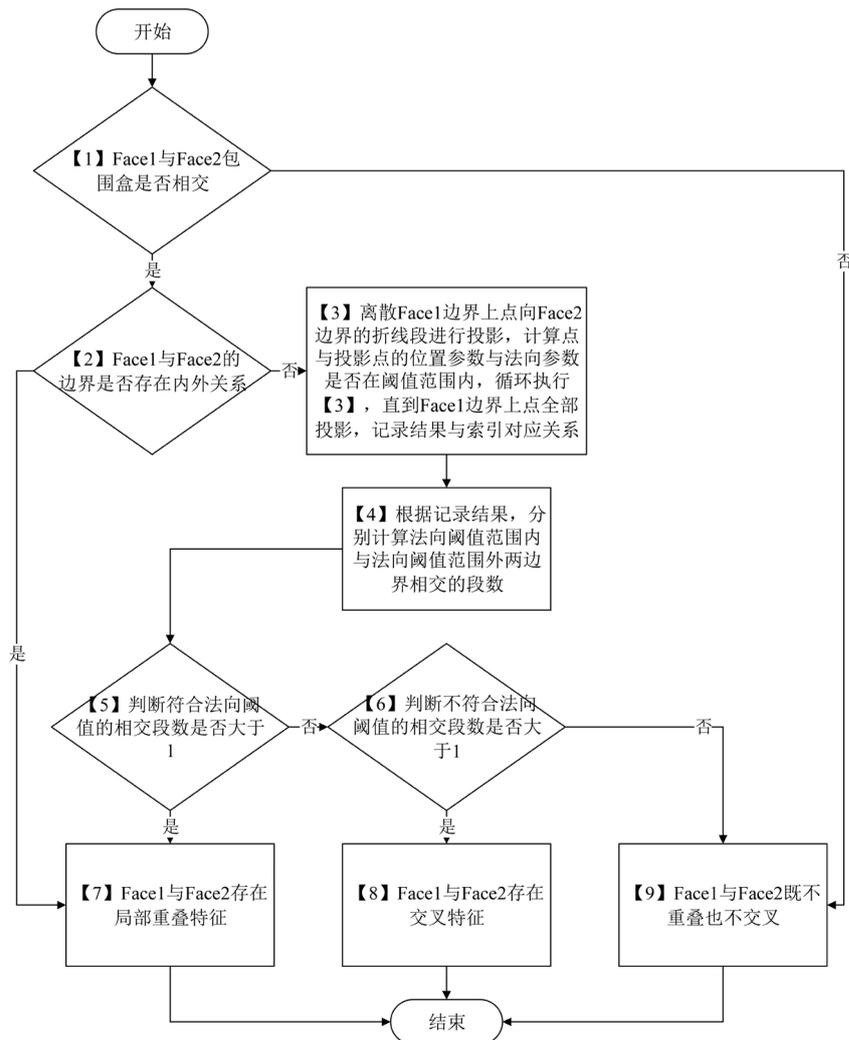


Figure 2. Flowchart of local overlap and crossover feature recognition

图2. 局部重叠与交叉特征识别流程图

【1】 Face1 与 Face2 包围盒是否相交，不相交则认为既不局部重叠余部交叉。

【2】通过计算 Face1 与 Face2 的边界的大小关系，计算小的边界每个点对应到大边界上的最小距离，若不都在阈值范围(阈值根据 Face1 与 Face2 包围盒计算)内，则认为不存在内外关系。若都在阈值范围内，判断对应点的法向是否一致，不一致则不存在内外关系，一致则存在内外关系。根据计算结果存在内外关系，则认为是覆盖重叠，删除掉小的面即可，若不存在内外关系，执行下一步。

【3】离散 Face1 边界上点向 Face2 边界的折线段进行投影，计算点与投影点的位置参数与法向参数是否在阈值范围内，循环执行【3】，直到 Face1 边界上点全部投影，记录结果与索引对应关系。

【4】根据记录结果，分别计算法向阈值范围内与法向阈值范围外两边界相交的段数。

【5】判断符合法向阈值的相交段数是否大于 1，大于 1 两个面局部重叠，小于等于 1，执行下一步。

【6】判断不合法向阈值的相交段数是否大于 1，大于 1 两个面交叉，小于等于 1，既不重叠也不交叉。

交叉特征分割流程如图 3 所示。

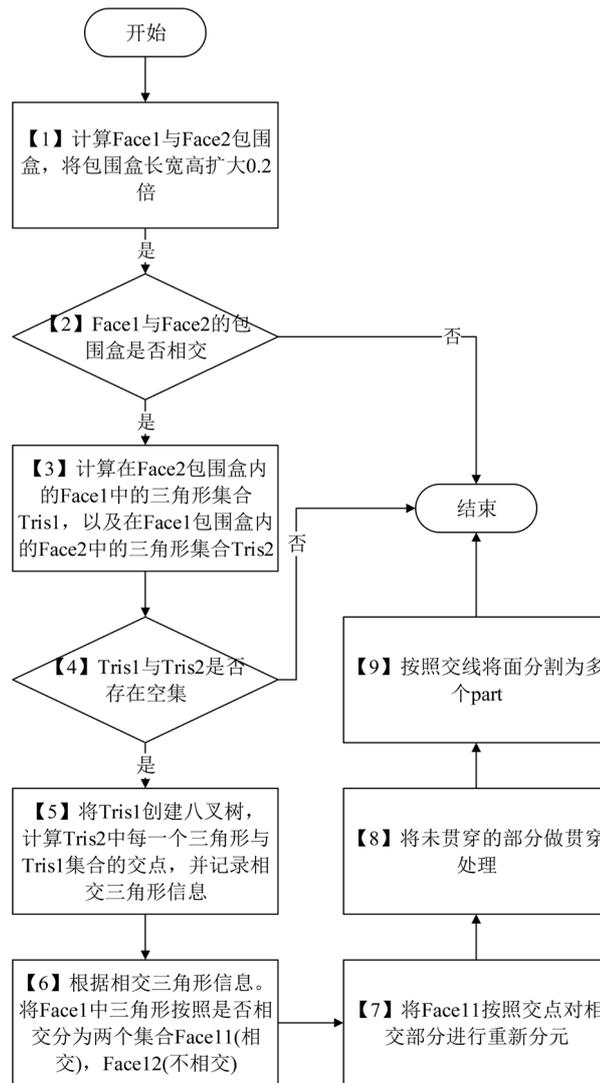


Figure 3. Flow chart of cross feature segmentation

图 3. 交叉特征分割流程图

- 【1】计算 Face1 与 Face2 包围盒，将包围盒长宽高扩大 0.2 倍。
- 【2】Face1 与 Face2 的包围盒是否相交，是执行下一步，否则不相交，不做分割处理。
- 【3】分别计算在 Face2 包围盒内的 Face1 中的三角形集合 Tris1，在 Face1 包围盒内的 Face2 中的三角形集合 Tris2。
- 【4】Tris1 与 Tris2 是否存在空集，若存在空集，不相交，不做分割处理。若不存在空集，执行【5】。
- 【5】将 Tris1 创建八叉树，计算 Tris2 中每一个三角形与 Tris1 集合的交点，并记录相交三角形信息。
- 【6】根据相交三角形信息。将 Face1 中三角形按照是否相交分为两个集合 Face11(相交)，Face12(不相交)。
- 【7】将 Face11 按照交点对相交部分进行重新分元。
- 【8】将未贯穿的部分做贯穿处理。贯穿方法：查找交线的端点，判断端点是否为边界上点，是则不进行处理，不是则按照交线方向延伸到边界上，使交线能够割开集合。
- 【9】按照交线将面分割为多个 part。
- 判断内外流程如图 4 所示。

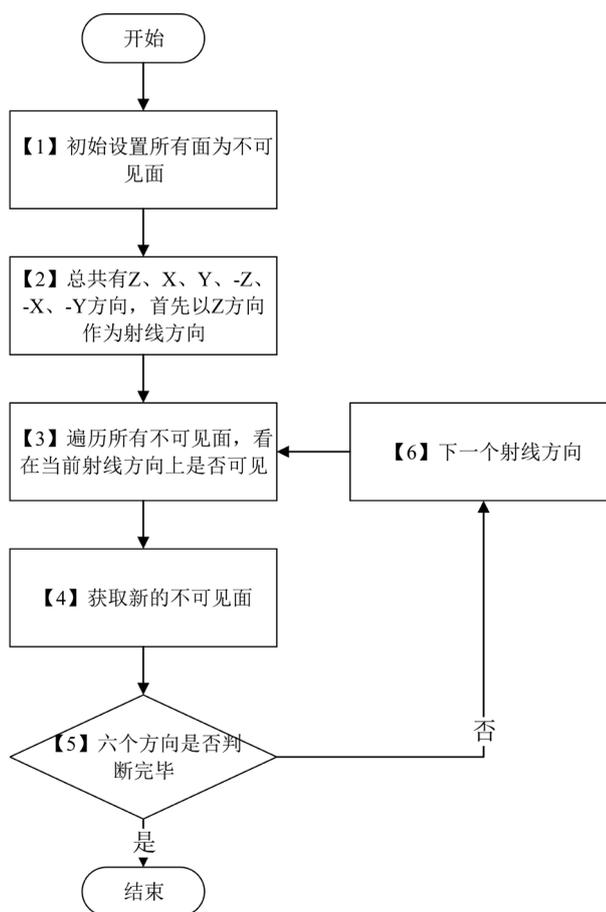


Figure 4. Internal and external calculation flow chart
图 4. 内外计算流程图

- 【1】初始状态下，当前所有面都设定为不可见面。
- 【2】总共判断 Z、X、Y、-Z、-X、-Y 六个方向，首先以 Z 方向作为射线方向，进行以下操作。

【3】遍历所有不可见面，取出面积最大的三角形。首先，若该三角形法向方向与当前射线方向垂直，则将该面放入临时不可见面中，对下一个面进行处理。在射线方向上延伸该三角形的包围盒，该包围盒与其他面 F 的包围盒相交时，沿三角形中心引射线与 F 求交，若有交点，则说明被遮挡，放入临时不可见面中。

【4】获取所有临时不可见面。

【5】六个方向是否完毕，是获得不可见面进行删除。否执行【6】。

【6】设定下一个射线方向，然后执行【3】。

4. 孔洞自动分类识别修复算法研究

针对模型孔洞的不同形态，对孔洞进行检测分类和修复，保证修复后的模型最大程度地接近原始模型。其步骤包括：根据输入模型数据，快速建立模型的面片、边和顶点的拓扑结构；根据边与面片的连接关系，获取模型中存在的所有孔洞；根据拓扑特点，将孔洞分为连续套洞和单孔洞，根据拓扑关系，将连续套洞分割为简单孔洞；根据孔洞的几何形态，识别孔洞类型，建立了缝隙→错位错误→环形孔洞→简单孔修复的基本修复步骤。该方法修复后的模型一方面保证修复后模型拓扑正确、填补孔洞区域曲率连续，另一方面保证修复后的模型最大程度的接近原始模型[2]。

鞋模孔洞自动分类识别与修复方法，包括以下步骤：

1) 解析输入模型的三角网格模型数据，识别模型中的退化三角面片和重复面片，并将退化三角面片和重复三角面片删除，快速建立模型的面与边、边与点之间的拓扑关系。

2) 根据面与边之间的连接关系，采用区域生成法计算模型的单连通区域，计算每个单连通区域的边界。

3) 根据拓扑关系将孔洞分为单孔洞和连续套洞；将连续套洞根据拓扑和几何形态，分割为单孔洞。

4) 对步骤(3)中识别的单孔洞，根据孔洞的几何形态，划分为缝隙、错位孔洞、环形孔洞以及简单孔洞。对每一种类型的孔洞，根据其几何形态，采用特定的填充方法进行孔洞修复。

4.1. 建立模型拓扑关系

对网格模型进行顶点去重等预处理，将三角网格数据解析为不重复的顶点和面顶点索引，根据面索引，识别模型中的退化三角面片和重复面片。

退化三角形的几何形态为至少有两点相同或三点共线，通过判断三角形的索引是否重复以及三角形的面积是否为零，判断是否为退化三角形。根据三角形的面索引，判断是否有重复三角形。重复三角形的特征为两个三角形的索引相同且方向相同。删除退化面和重复面后，计算三角网格模型的拓扑关系，其中面与边的拓扑关系为三角面片的边邻接的面片，边与点的拓扑关系为三角形的顶点邻接的边。

4.2. 单连通区域边界识别

模型拓扑关系建立后，计算每个单连通区域的孔洞，先采用区域生成法计算模型的单连通区域，然后计算单连通区域的孔洞。

4.2.1. 单连通区域

区域生成法计算模型单连通区域的算法流程图如下：图 5。

【1】将所有输入三角面片标记为未访问。

【2】从所有未访问的三角面片中，找出一个面片，将其中一条边作为种子边，添加到种子边集合中。当前面片添加到当前部件集合中，并设置访问标记为已访问。

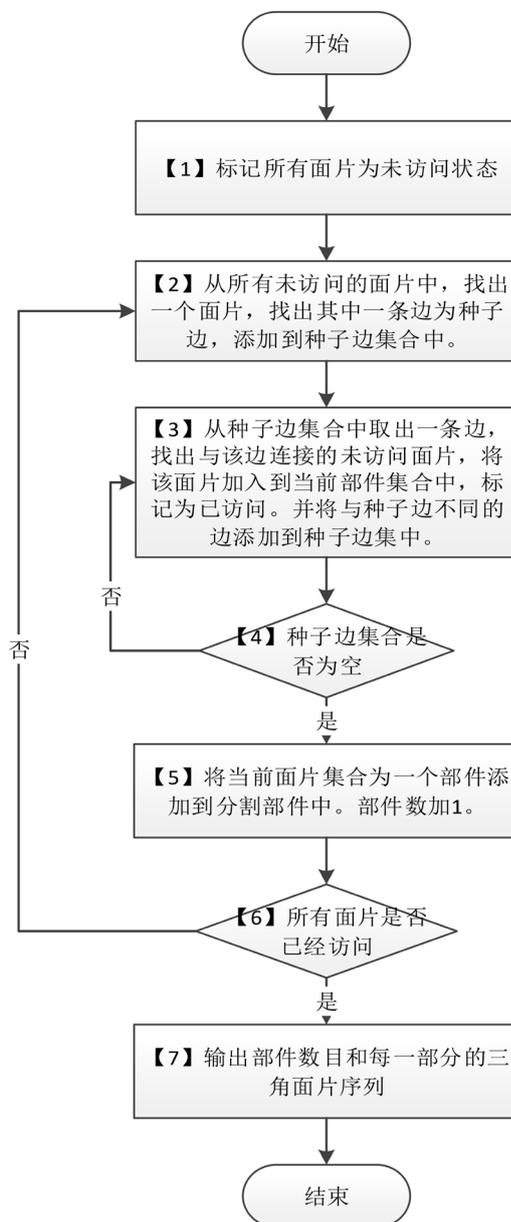


Figure 5. Simple connected calculation flow chart
图 5. 单连通计算流程图

【3】从种子边集合中取出一条边，找出与该边连接的未访问面片，将该面片加入到当前部件集合中，标记为已访问。并将与种子边不同的边添加到种子边集中。

【4】循环执行【3】，直到种子边集合为空。

【5】将当前部件中的面片输出作为一个部件。部件数目加一。

【6】重复执行【2】到【5】，直到所有面片均已访问。

4.2.2. 边界识别

三角网格模型如果没有边界，则每个三角面片的边应邻接两个三角形，该类型的边称为内部边，这样的网格模型也称水密封的，是可以直接切片 3D 打印的。

仅邻接一个三角形的边称为自由边。将所有自由边首尾相连，就得到模型的边界。模型边界计算算法流程图如图 6。

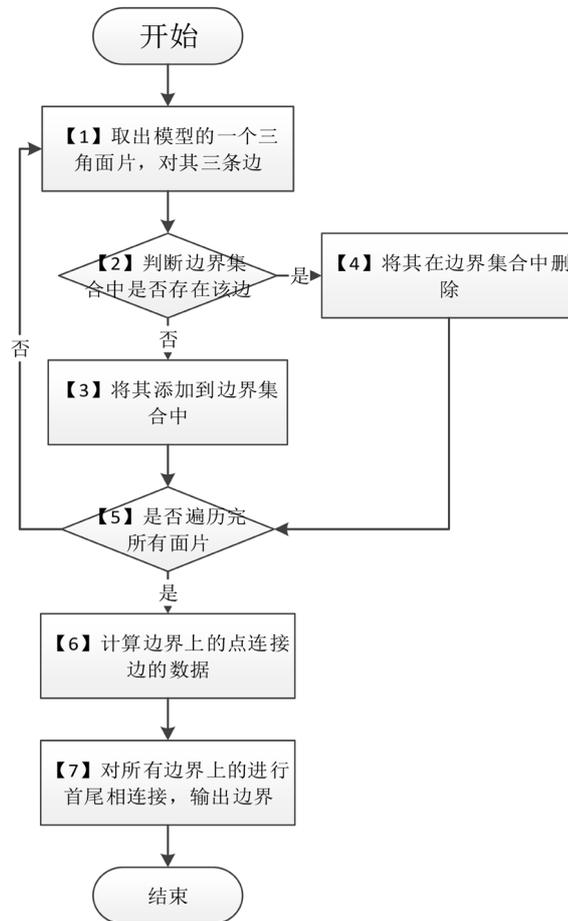


Figure 6. Boundary calculation flow chart
图 6. 边界计算流程图

- 【1】取模型中的三角面片，获取其三条边。
- 【2】判断边界边集合中是否存在该边。如果存在，则执行【4】，否则执行【3】。
- 【3】将边添加到边界集合中。
- 【4】将边在边界集合中删除。
- 【5】遍历所有面片，重复执行【1】到【4】。
- 【6】计算边界边集合中的所有点和边的连接关系。
- 【7】将所有边界首尾相连接，组成边界。

4.3. 连续套洞识别与修复

根据拓扑关系将孔洞分为单孔洞和连续套洞，本节主要介绍连续套洞的识别与修复，连续套洞的识别与修复比较困难，通过拓扑结构可以检测出所有的洞边界，根据连续套洞边界上点与边的连接关系，如果一个边界上的点连接的边超过两条，就认为该点是连续套洞的分割点，通过查找所有的分割点面，根据最短路径法将连续套洞分割为简单的孔洞，从而完成修复。连续套洞的示意图如图 7 所示。

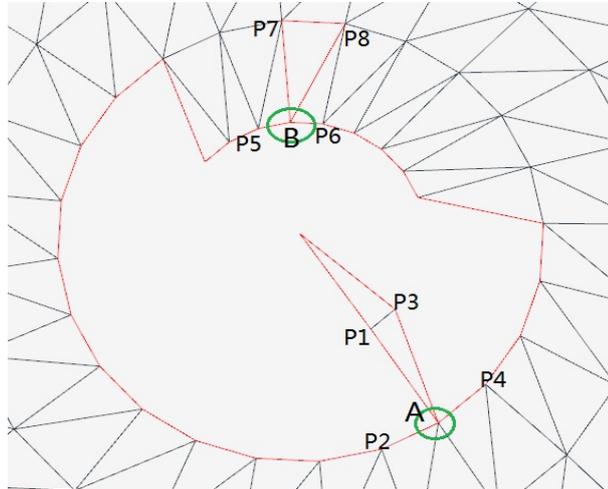


Figure 7. Schematic diagram of continuous sleeve hole
图 7. 连续套洞示意图

连续套洞的识别算法流程图如图 8。

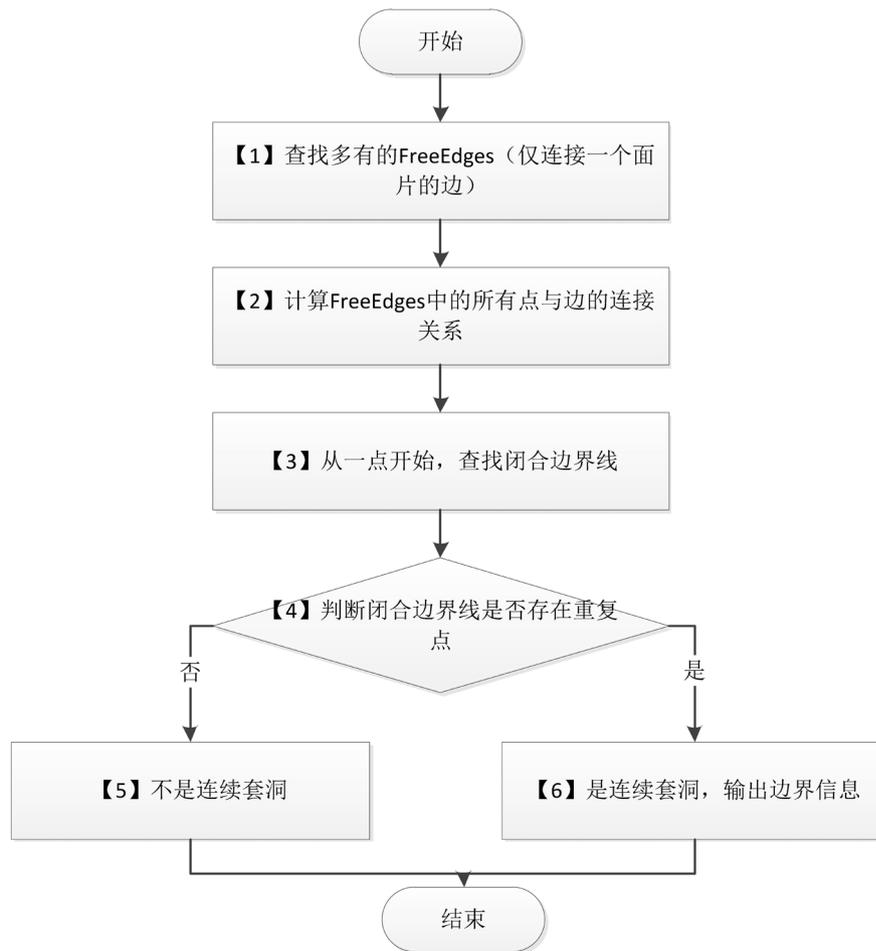


Figure 8. Recognition flow chart of continuous hole
图 8. 连续套洞识别流程图

连续套洞修复流程如图 9 和图 10 所示。

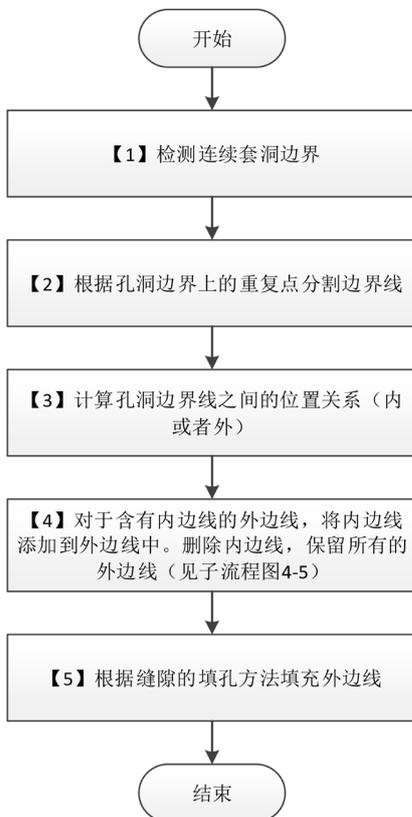


Figure 9. Continuous hole repair flow chart
图 9. 连续套洞修复流程图

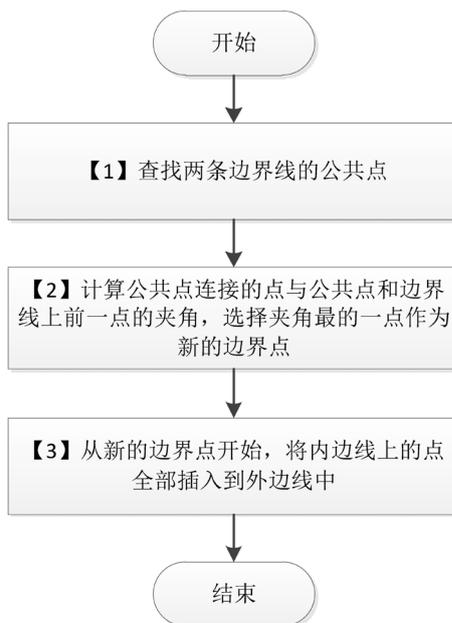


Figure 10. Flow chart of segmented continuous sleeve holes
图 10. 分割连续套洞子流程图

流程介绍:

【1】检测连续套洞边界，可以检测出孔洞的重复点。例如图 7 中的 A、B 两点。

【2】根据重复点，对边界线进行分割。例如图 7 中，分割成三个单独的孔。

【3】将孔洞边界点投影到平面上，计算各位孔洞的内外位置关系。

【4】对于外部的孔，检测其内部是否有孔洞。对于内部含有孔洞的边界，将外边界与内边界合成一条边界。例如图 7 中，分割后为两条孔，分别为：(1) P2-A-P1-P3-P4-P6-B-P5-P2 和(2) B-P9-P7-B。

【5】依据填充缝隙的方法，填充单独的孔，完成连续套洞的修复。

4.4. 单孔洞分类识别与修复

单孔洞根据几何形态识别分类的方法为：对前面识别出的单孔洞根据如下类型和几何形态划分为缝隙、错位错误、环形孔洞和简单孔洞。

4.4.1. 缝隙识别与修复

缝隙错误的几何形态和修复方法为：

缝隙在几何形态上为特别狭长的孔，通过检测边界中多个点是否共线且首尾相接构成的边是原网格模型的边，可以找到错误顶点，通过将共线边分割，对共线边所在的三角面片重新分元修复缝隙错误。

1) 缝合流程

缝合整体流程如图 11。

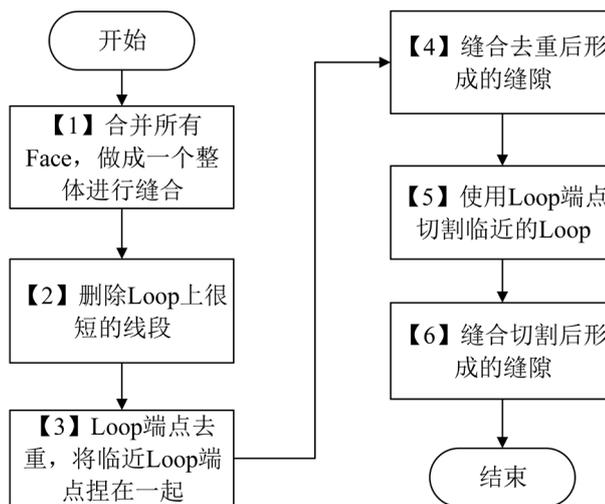


Figure 11. Suture flow chart

图 11. 缝合流程图

注：缝合时用到的 Loop，不是我们通常意义上的闭合 Loop，而是按照一定角度阈值拆开的一段段的线段(图 12)。

【1】：缝合时，是对模型中的所有 Loop 整体处理的。文件导入时网格数据是一个面一个面分别存储的，此时如果没有合并的话，需要先进行合并。

【2】：遍历每个 Loop，将其中阈值范围内的小段删除，对应删除三角形，更新拓扑关系。每个 Loop 最少有两个点(起始终止点)，即使两点距离也很短，此处也没有删除。即 Loop 的个数不变。

【3】：取出所有 Loop 的端点，进行顶点去重。这样距离近的端点捏在一起，使之形成可缝合的结构。

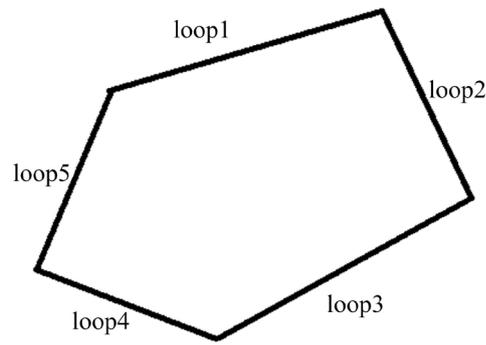


Figure 12. Schematic diagram of LOOP
图 12. LOOP 示意图

【4】：起点和终点均相同的 Loop 放在一起，表示形成了可缝合的结构。首先判断是否可以缝合，判断条件即为：由一条 Loop 上的点，向另一条 Loop 找最近点和投影点。当到最近点和投影点的距离均大于阈值时，表示缝太大，不能缝合。

【5】：计算在 Loop 包围盒内的其他 Loop 端点，记录 Loop 和待切割点的对应关系。对于每一个 Loop 和切割点对，依次遍历每个点，计算到 Loop 的最近点和投影点，优先使用最近点分割 Loop，最近点距离较远时，再使用投影点分割。

【6】：分割后形成了可缝合的结构，接下来与步骤【4】相同，进行缝合。

2) 缝合算法

假定待缝合的两 Loop，分别为 Loop1 和 Loop2。为与代码保持一致，这里也使用 S_i 、 E_i 、 S_j 和 E_j 表示 Loop 上的点。 S_i 表示 Loop1 上已缝合的最后一个点， E_i 表示 Loop1 上要开始缝合的点， $E_i = S_i + 1$ 。 S_j 表示 Loop2 上已缝合的最后一个点， E_j 表示 Loop2 上要开始缝合的点， $E_j \geq S_j$ 。

遍历 Loop1 中的每个点 E_i ，首先查找 Loop2 中距离 E_i 最近的点 E_j 。

【1】：首先判断是否要删除小面片。两种情况：1)、Loop1 中的 E_i 到 Loop2 中的最近点，与 E_i 的下一个点 $E_i + 1$ 到 Loop2 中的最近点。两个最近点是否相同且距离都小于阈值，如满足则删掉 $E_i E_i + 1$ 连接的面片。此时 E_i 和 $E_i + 1$ 距离应该很小(当前点与下一个点找到同一个点)。2)、Loop1 中的 E_i 到 Loop2 中的最近点为 S_j ，且在阈值范围内，则删除 $S_i E_i$ 连接的面片。此时 S_i 和 E_i 距离应该很小(当前点与上一个点找到同一个点)。

【2】：当 E_i 到 E_j 距离小于阈值时，根据 E_j 的位置有两种情况：图 13。

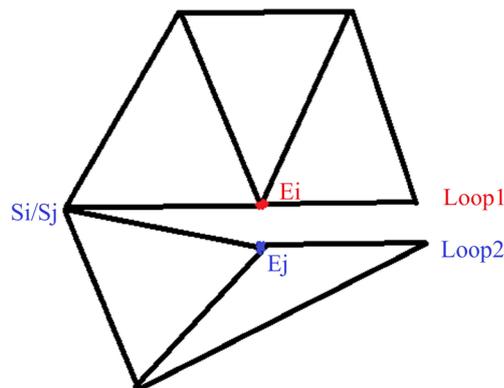


Figure 13. First schematic diagram of Case of E_j
图 13. E_j 情况 1 示意图

1)、直接拖拽 $E_j = S_j + 1$:

直接将 E_i 和 E_j 拖拽在一起即可, 即将 E_i 索引改为 E_j 。

2)、分割三角形 $E_j \neq S_j + 1$ (图 14)

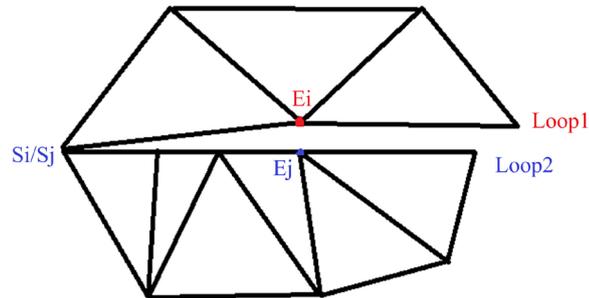


Figure 14. Second schematic diagram of Case of E_j
图 14. E_j 情况 2 示意图

此时 S_j 和 E_j 之间有多个点。首先计算 S_j 到 E_j 之间的点 S_m (多个), 每个点与 D_i 相连, E_i 和 E_j 合并, 删掉原始三角形 $D_i S_i E_i$ 即可(图 15)。

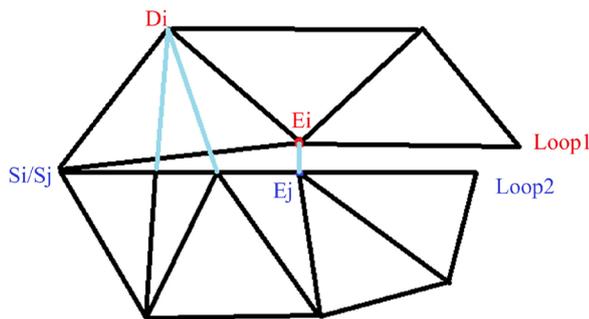


Figure 15. Schematic diagram of repaired
图 15. 修复示意图

【3】: 当 E_i 到 E_j 距离大于阈值, 根据 E_j 的位置有三种情况:

1)、 $E_j == S_j$ (图 16)

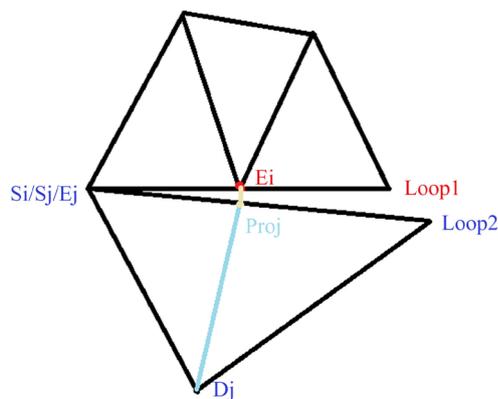


Figure 16. Schematic diagram of $E_j = S_j$
图 16. $E_j = S_j$ 示意图

此时计算 E_i 在 $E_j E_{j+1}$ 上的投影点 $Proj$ ，如果 E_i 到 $Proj$ 的距离小于阈值，则合并点 E_i 和 $Proj$ ，分割三角形 $E_j E_{j+1} D_j$ 。

2)、 $S_j \neq E_j$ 。此时计算 $S_i E_i$ 的距离，与 $S_j S_{j+1}$ 距离的大小关系。

如果 $S_i E_i < S_j S_{j+1}$ ，此时即为 $S_{j+1} = E_j$ (图 17)。

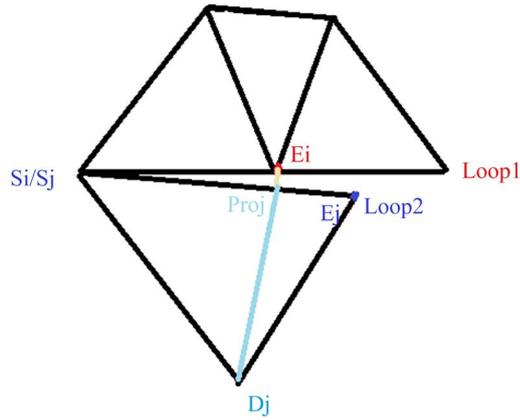


Figure 17. Schematic diagram of $S_i E_i < S_j S_{j+1}$
图 17. $S_i E_i < S_j S_{j+1}$ 示例图

此时计算 E_i 在 $S_j S_{j+1}$ 上的投影点 $Proj$ ，如果 E_i 到 $Proj$ 的距离小于阈值，则合并点 E_i 和 $Proj$ ，分割三角形 $S_j S_{j+1} D_j$ 。

如果 $S_i E_i \geq S_j S_{j+1}$ ，此时即为 $S_{j+1} = E_j$ (图 18)。

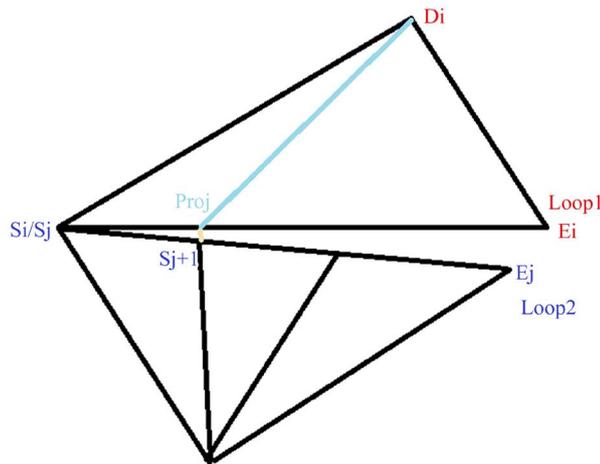


Figure 18. Schematic diagram of $S_i E_i \geq S_j S_{j+1}$
图 18. $S_i E_i \geq S_j S_{j+1}$ 示意图

此时计算 S_{j+1} 在 $S_i E_i$ 上的投影点 $Proj$ ，如果 S_{j+1} 到 $Proj$ 的距离小于阈值，则合并点 S_{j+1} 和 $Proj$ ，分割三角形 $S_i D_i E_i$ 。

4.4.2. 不共顶点错误识别与修复

不共顶点错误违反了 STL 文件的共顶点规则，由于顶点不重合导致相邻的三角面片的重合顶点数少于两个，此时三角形的顶点落在相邻三角形的边上，但没有出现裂缝。通过检测边相邻的三角形共线点，

就可以找到错误顶点，通过将该错误顶点移动到与其距离最近的顶点处修复不共顶点错误。

不共顶点错误修复流程如下图所示：图 19。

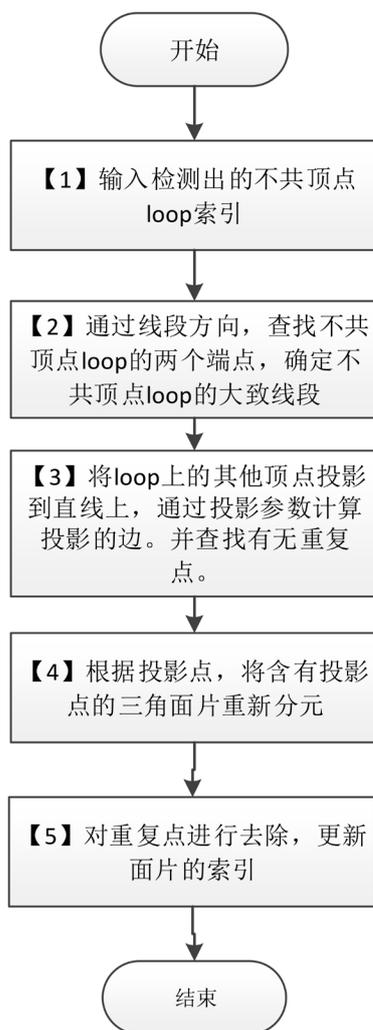


Figure 19. Flowchart of different vertex
图 19. 不共顶点修复流程图

流程说明：

- 【1】输入检测出的不共顶点 loop 索引。
- 【2】通过线段方向，查找不共顶点 loop 的两个端点，确定不共顶点 loop 的大致线段。
- 【3】将 loop 上的其他顶点投影到直线上，通过投影参数计算投影的边。并查找有无重复点。
- 【4】根据投影点，将含有投影点的三角面片重新分元。
- 【5】对重复点进行去除，更新面片的索引。

4.4.3. 错位错误识别与修复

错位错误是指应该重合的顶点没有重合所导致的。错位的点表现在模型上也属于拓扑上的缝隙，通过检测点到最近边的距离，小于指定距离的点视为错位错误，通过合并顶点的方法即可以将其修复(图 20)。

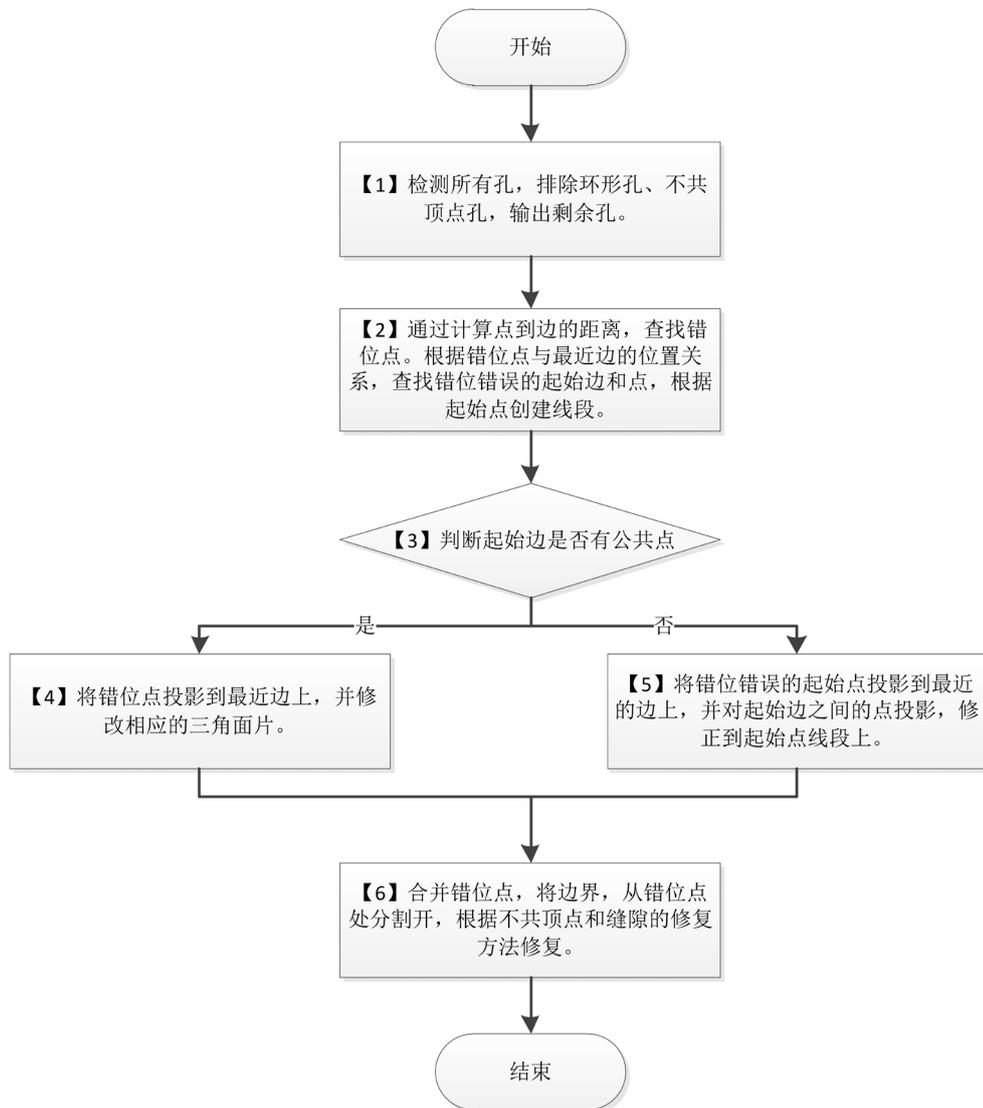


Figure 20. Flowchart of mismatch check and repair

图 20. 错位错误检查与修复流程图

流程说明:

【1】检查模型中的所有孔，检测出所有的孔洞。检查环形孔和不共顶点孔，将其他孔作为检查错位错误的输入孔。

【2】通过计算点到边的距离，查找错位点。根据错位点与最近边的位置关系，查找错位错误的起始边和点，根据起始点创建线段。

【3】判断【2】中计算的错位的起始边是否有公共点，如果有则执行【4】，否则执行【5】。

【4】将错位点投影到最近边上，并修改相应的三角面片。

【5】将错位错误的起始点投影到最近的边上，并对起始边之间的点投影，修正到起始点线段上。

【6】合并错位点，将边界，从错位点处分割开，根据不共顶点和缝隙的修复方法修复。

4.4.4. 环形孔洞的识别和修复

环形孔洞是由两条相近相似的边界组成的孔洞。其连接的是模型中两个不连续的部分。通过检测不

同组件的边界之间的距离，识别环形孔洞的两条边界。对环形孔洞进行填充。

环形孔洞是由两个 Loop 组成。构成洞的 Loop，一种是网格本身的自由边组成，另一种需要切割 Loop 组合而成，比如：图 21。

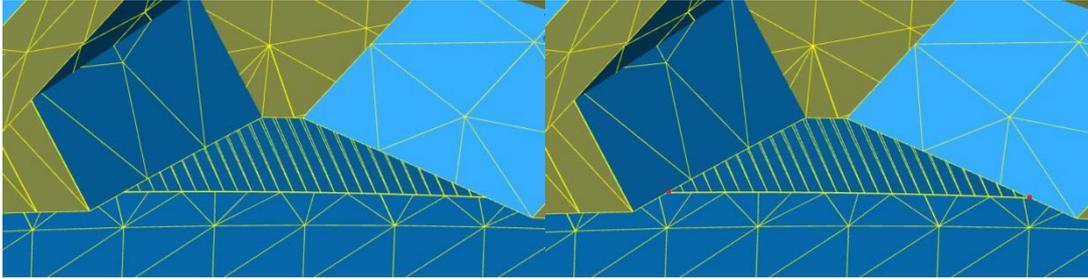


Figure 21. Diagram of annular hole
图 21. 环形孔洞示意图

此时需要分割三角形，形成孔洞 Loop (图 22)。

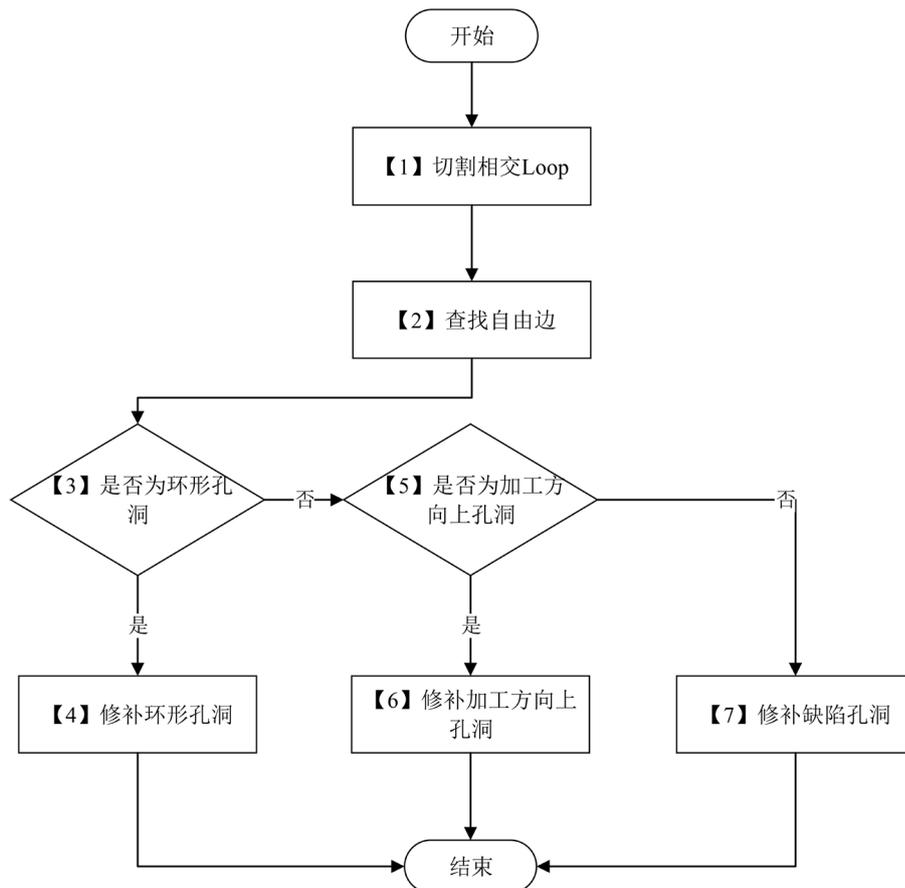


Figure 22. Flowchart of remaining holes classification, identification and repair
图 22. 剩余孔洞分类识别修复流程图

【1】获取整个模型的 Loop，计算交点，分割三角形。

【2】获取重新分元后的网格的 Loop。

【3】两两 Loop 组合，判定是否为环形孔洞。若是，执行【4】；不是，执行【5】。

【4】使用拉链补洞方法修补环形孔洞。

【5】剩余 Loop 为单连通孔洞，判定是否为加工方向上形成的孔洞。若是，执行【6】；不是，执行【7】。

【6】根据 Loop 形态，判定是 XYZ 哪个方向上的孔，拆成两段，也是用拉链补洞方式补洞。

【7】使用角度方式补洞。

Loop 的切割分为两类，一种是 Loop 之间切割，一种是 Loop 自身切割。以 Loop 之间切割为例说明，Loop 自身切割类似(图 23)。

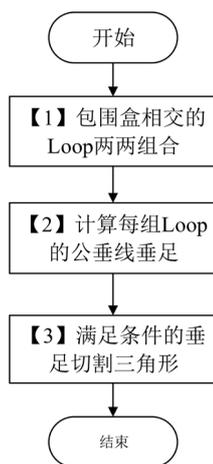


Figure 23. Flowchart of Loop Segmentation

图 23. Loop 分割流程图

【1】计算包围盒相交的两两 loop 组合。

【2】每组 Loop 中的两线段求公垂线垂足，若两线段对应的垂足都在线段上，且不在起点和终点，且距离很近。此时我们认为两线段需要在垂足处切割，记录线段索引与垂足(从两线段的垂足中任取一个)的关系 $\text{map}\langle\text{pair}\langle\text{int}, \text{int}\rangle, \text{vector}\langle\text{MeshPoint}\rangle\rangle$ 。

【3】根据获得的 map，对分割点(垂足点)排序后，切割三角形。

1) 一般性环形孔洞识别与修复

一般性环形孔洞的识别，首先计算模型的部件和每一个部件的边界。对每一个孔洞边界，在其他部件的边界中查找与其距离最近的边界，例如，边界 L0 的最近边界是 L1，如果 L1 的最近边界也是 L0。则认为(L0, L1)组成一个环形孔。

流程如下图所示：图 24。

一般性环形孔洞识别流程介绍：

【1】计算模型中不连续的面片部件。

【2】如果部件数目小于 2，表明没有环形孔洞，结束。

【3】计算每一个部件的边界。

【4】如果有边界的部件数目小于 2，则表明没有环形孔洞，结束。

【5】计算每一条边界在其他部件中的最近边界，如果边界 L0 的最近边界是 L1，且 L1 的最近边界是 L0，则认为 L0, L1 组成环形孔洞。

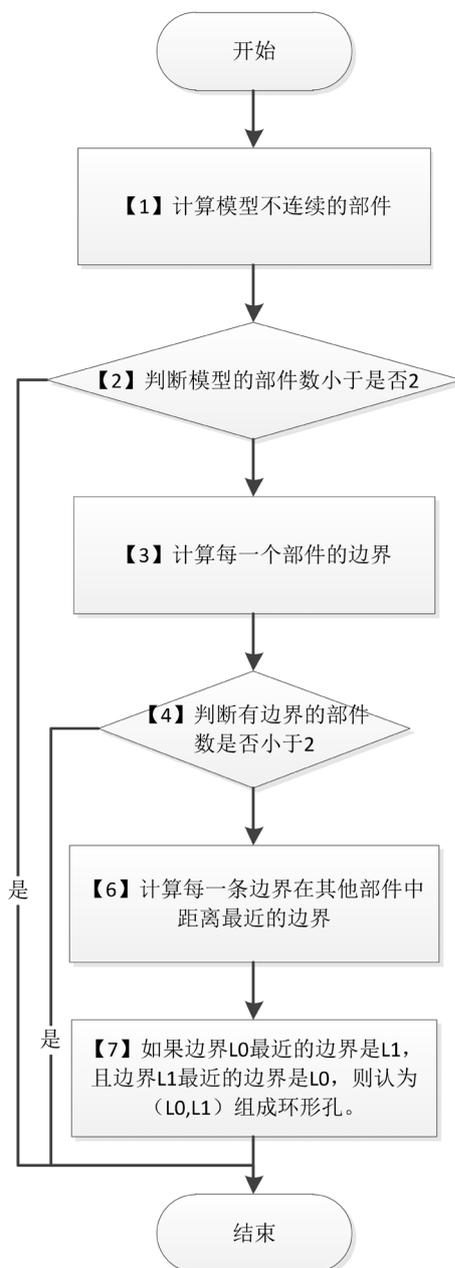


Figure 24. Flowchart of general annular hole inspection
图 24. 一般性环形孔洞检查流程

一般性环形孔洞修补流程如下图所示：图 25。

- 【1】 将环形孔洞，即 Loop 对(Loop1、Loop2)，调整成同一旋转方向。
- 【2】 匹配 Loop1、Loop2 折点，并记录匹配索引。
- 【3】 调整 Loop2 中距离 Loop1 中第一个点最近且不超过对应折点索引点为起点。
- 【4】 变换 Loop1 和 Loop2，使 Loop1 中点个数大于等于 Loop2 中点个数。
- 【5】 Loop1 中点查找 Loop2 中最近点，不超过折点索引，取最近点索引，超过取对应折点的索引。
- 【6】 根据索引信息，连接三角形，最终完成补洞(图 26)。

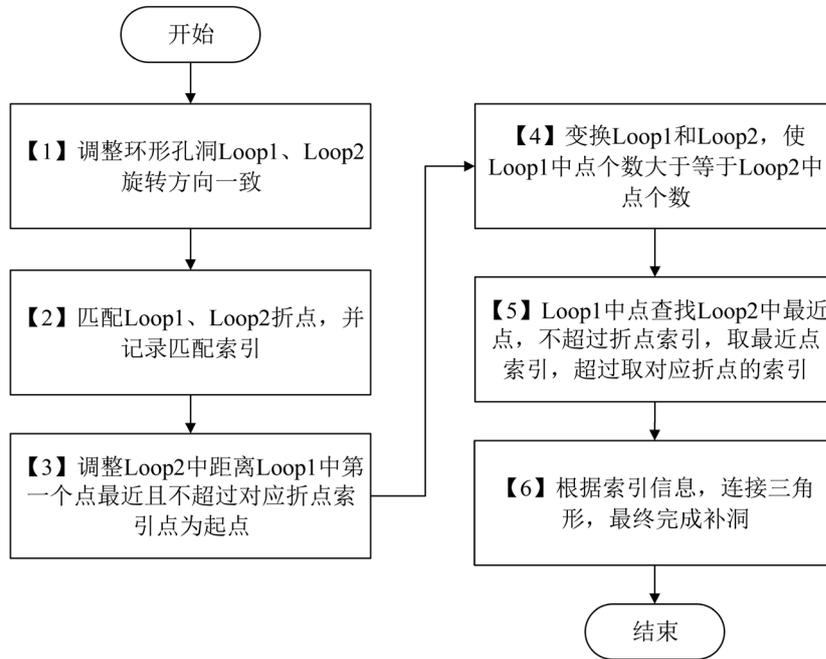


Figure 25. Flowchart of general annular hole repair
图 25. 一般性环形孔洞修复流程图

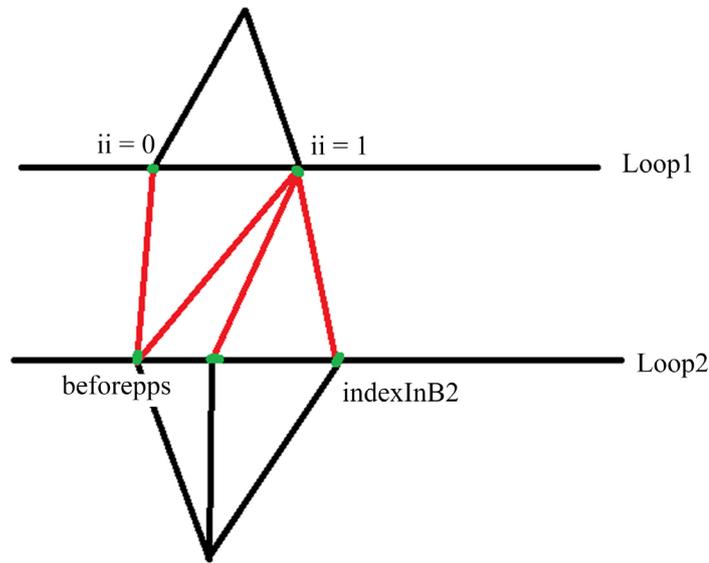


Figure 26. Schematic diagram of general annular hole repair
图 26. 一般性环形孔洞修复示意图

2) 加工平面孔洞识别和修复

一般性环形孔洞修补流程如下图所示：图 27。

【1】Loop 分别向 Z、X、Y 单个方向上投影，计算投影后多边形的面积，当最小面积大于一定阈值时，认为是缺陷孔洞，否则将面积最小的方向即为加工方向。

【2】计算投影后线段间的夹角。理论上，在折回位置，两线段夹角几乎为 0。实际模型中，由于设计的不标准或裁剪结果误差，导致该处夹角虽然比较小，但可能不是最小。首先根据两线段向量叉乘方

向进行初步的排除，当叉乘方向与加工方向夹角很小时排除。

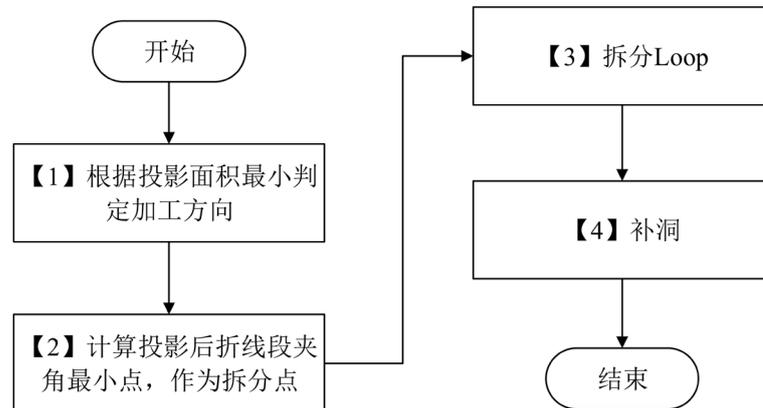


Figure 27. Recognition and repair of hole of machined plane
27. 加工平面孔洞识别与修复流程图

【3】在最小角度的两个位置处，拆开 Loop。

【4】采用与环形孔洞补洞方式修复。

注：计算线段间夹角时，当夹角小于一定阈值时，作为折点存入。当折点数小于 2 时，取夹角最小的两个点作为折点；当折点大于 2 时，需分割 Loop。

加工平面孔洞修复效果如图 28。

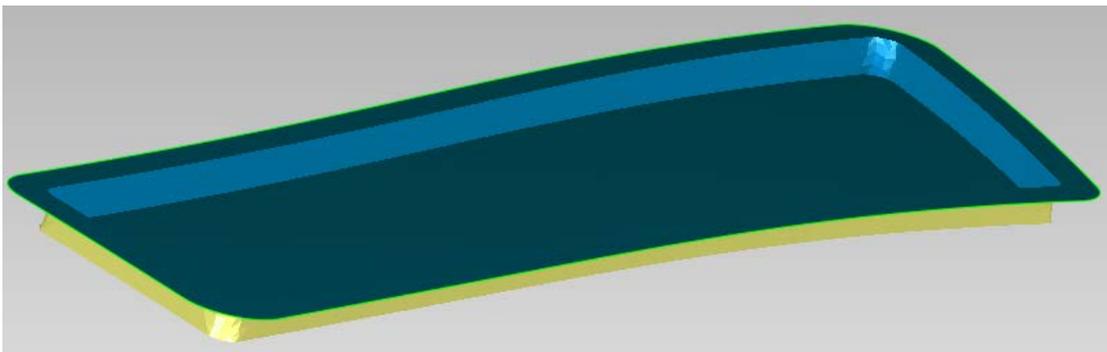


Figure 28. Diagram of annular hole repair of machined plane
图 28. 加工平面环形孔洞修复示意图

4.5. 简单孔洞修复

通过上述识别，将所有孔洞中的缝隙、错位错误、环形孔洞修复后，剩余的孔洞均作为简单孔洞处理，其修复方法为：图 29。

流程介绍：

【1】点拟合平面算法：根据点坐标以及点的重心，构造一个 3×3 的矩阵，使用 Jacobi 方法计算上述矩阵的特征值和特征向量，特征值的存储顺序是从大到小的，特征向量与特征值对应，取第一个特征向量作为 x 方向，最小特征值对应的特征向量，作为面法向，右手法则构建局部坐标系。

【2】根据【1】中创建的平面，将边界点投影到平面上。并通过【1】中输出的局部坐标系，将平面上的投影点变换到局部坐标系下。

- 【3】在局部坐标系下，将孔洞边界点连接成的多边形，进行重新分元。
- 【4】对分元后的网格模型进行精确整体变形，使其满足一定的连续性条件。

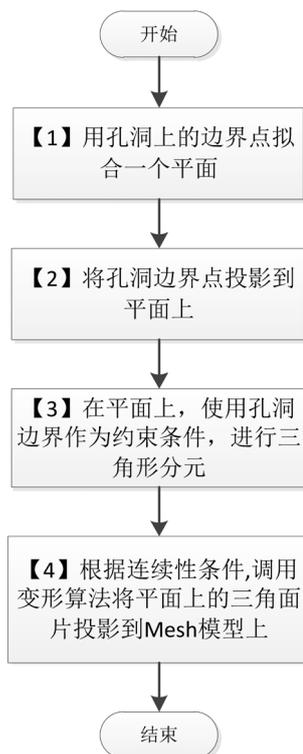


Figure 29. Flowchart of simple hole repair
图 29. 简单孔洞修复流程

5. 孔洞自动分类识别与修复在鞋模修复中的应用成果

5.1. 预处理应用

第三章第一节重复面错误处理算法应用效果如下：图 30，图 31。

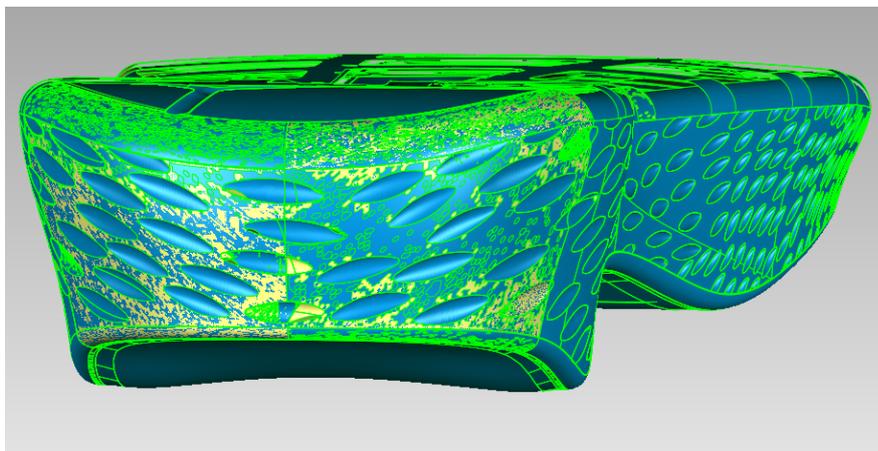


Figure 30. Before the removing duplicates
图 30. 去重前

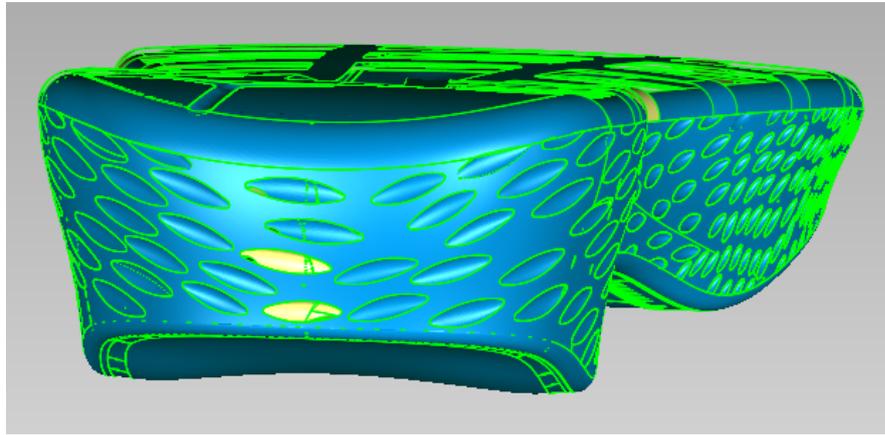


Figure 31. After the removing duplicates
图 31. 去重后

第三章第二节局部重叠和交叉处理算法应用效果如下：图 32，图 33。

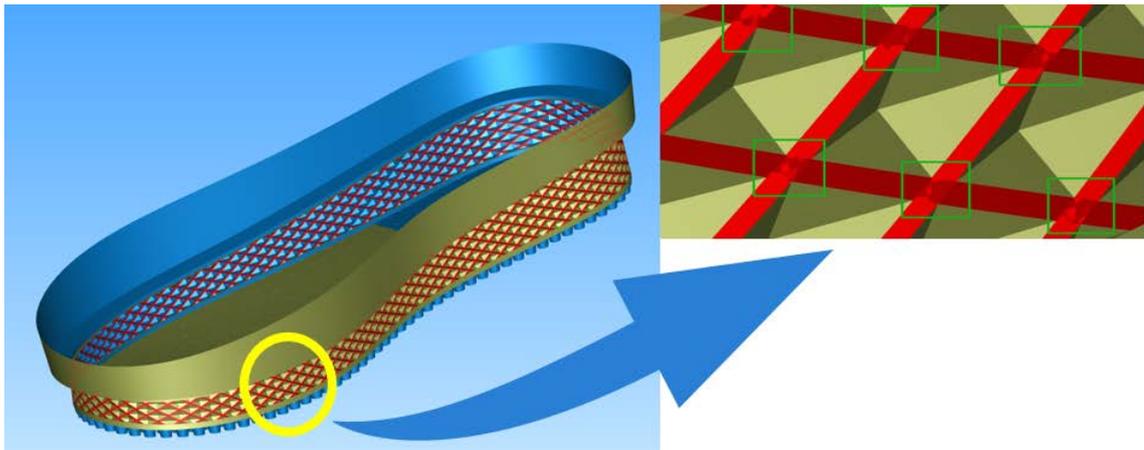


Figure 32. Before the repair partly overlapping surfaces
图 32. 局部重叠面处理前

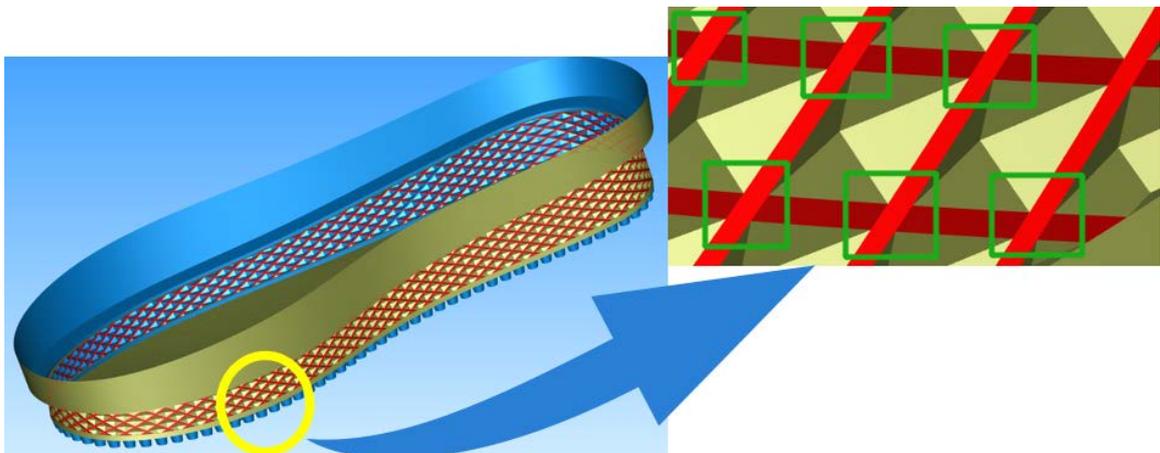


Figure 33. After the repair partly overlapping surfaces
图 33. 局部重叠面处理后

5.2. 孔洞自动分类识别与修复

使用第四章算法建立模型拓扑关系后识别单连通区域，各类孔洞进行分类识别，缝隙修复与简单孔洞修复效果分别如下图所示：图 34~37。

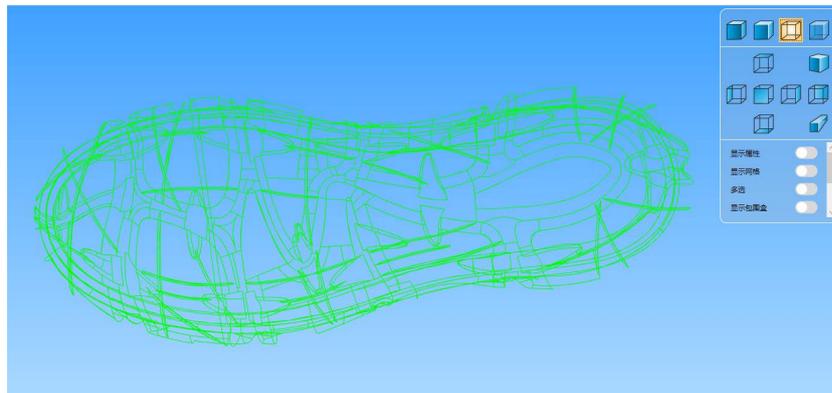


Figure 34. Before the crevice repaired

图 34. 缝隙缝合前



Figure 35. After the crevice repaired

图 35. 缝隙缝合后



Figure 36. Before the hole filling

图 36. 孔洞填充前



Figure 37. After the hole filling

图 37. 孔洞填充后

6. 结论

为了解决消费级模型鞋模修复中存在的多样孔洞问题，提出了一种基于孔洞自动分类识别与修复的方法，将孔洞按照拓扑关系划分为单孔洞和连续套洞，根据几何形态划分为缝隙、错位孔洞、环形孔洞、简单孔洞等几类孔洞，对每一类型的孔洞，根据其特点，有针对性地进行修复。对于简单孔洞类型采用这种新的填孔算法，可以达到自动修复模型孔洞，同时获取较好修复效果的目的。将这种方法应用到鞋模的孔洞修复中，可以保证修复后的鞋模拓扑正确、填补孔洞区域曲率连续，使鞋模最大程度的接近原始模型。

通过比较发现，修复后的鞋模拓扑正确、填补孔洞区域曲率连续，并且鞋模最大程度的接近原始模型，可以为后续 3D 打印设备提供优质的模型。

基金项目

国家重点研发计划资助(2018YFB1106200)。

参考文献

- [1] 赵江洪, 孙铭悦, 王殷瑞, 窦新铜, 张晓光. 三维点云孔洞修复方法综述[J]. 测绘科学, 2021, 46(1): 114-123.
- [2] 王继伟, 张应中, 罗晓芳. 基于孔洞区域特征分割的复杂孔洞修复方法[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(5): 54-56.