



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113348459 A

(43) 申请公布日 2021.09.03

(21) 申请号 201980073804.5

(22) 申请日 2019.05.28

(30) 优先权数据

62/758,053 2018.11.09 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.05.08

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2019/034221 2019.05.28

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2020/096647 EN 2020.05.14

(71) 申请人 欧特克公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 M.C. 马里诺夫 P.H. 查罗特

S. 弗鲁塔 N. 桑塔纳姆

J.N. 哈莱特 S.A. 巴利

J.A. 弗劳尔 G.T. 芬尼甘

S.N. 梅什卡特 I.E. 亨利

T.W. 巴贝克 M. 萨普恩

M. 阿马格利亚尼 P. 沃斯基

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 胡琪

(51) Int. Cl.

G06F 30/23 (2020.01)

G06T 17/00 (2006.01)

G06F 30/10 (2020.01)

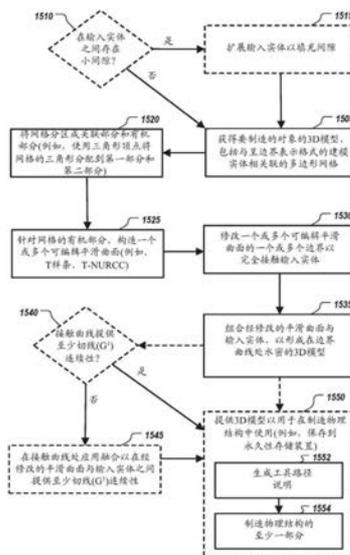
权利要求书3页 说明书25页 附图12页

(54) 发明名称

计算机辅助设计中生成式设计几何结构到可编辑且水密边界表示的转换

(57) 摘要

在至少一个方面,用于物理结构的计算机辅助设计的方法、系统和设备、包括介质编码的计算机程序产品包括一种通过利用生成式求解器输入和表示来进行以下操作而将生成式设计转换成可编辑水密B-REP的全自动方法:(1)在所述设计与所述输入一致的位置嵌入确切的输入实体边界曲面;(2)利用全局平滑可编辑“有机”曲面在所有其他位置逼近设计边界;并且(3)接合所有曲面以形成生成式设计输出B-REP。



1. 一种方法,其包括:

在计算机辅助设计程序中获得要制造的对象的第一三维模型,其中所述第一三维模型包括通过生成式设计过程产生的多边形网格,所述生成式设计过程采用一个或多个输入实体作为所述生成式设计过程的优化域的一个或多个子空间,所述一个或多个输入实体呈边界表示格式;

通过所述计算机辅助设计程序将所述多边形网格分区成与所述一个或多个输入实体关联的第一部分和与所述一个或多个输入实体关联的第二部分;

通过所述计算机辅助设计程序针对所述多边形网格的所述第二部分构造一个或多个可编辑平滑曲面,其中所述一个或多个可编辑平滑曲面中的每一者具有允许全局平滑自由形式曲面编辑的全局平滑参数化;

通过所述计算机辅助设计程序修改所述一个或多个可编辑平滑曲面的一个或多个边界,以在一个或多个接触曲线处接触所述一个或多个输入实体,所述一个或多个接触曲线与所述一个或多个经修改的平滑曲面与所述一个或多个输入实体之间的未经修改的边界同胚;以及

通过所述计算机辅助设计程序组合所述一个或多个经修改的平滑曲面与所述一个或多个输入实体以形成所述要制造的对象的第二三维模型,其中所述第二三维模型包括在一个或多个无间隙接触曲线处与呈所述边界表示格式的所述一个或多个输入实体的一个或多个部分接触的所述一个或多个经修改的平滑曲面,其中所述第二三维模型是水密的,并且其中所述一个或多个无间隙接触曲线中的每一者和所述一个或多个经修改的平滑曲面中的每一者能够使用自由形式建模操作来编辑。

2. 如权利要求1所述的方法,其中所述生成式设计过程采用体积网格方法来创建所述对象的生成式设计,并且所述多边形网格包括与所述生成式设计的边界一致的原始的或转换而成的三角形网格。

3. 如权利要求1所述的方法,其中所述生成式设计过程采用水平集方法来创建所述对象的生成式设计,并且所述多边形网格包括逼近所述生成式设计的原始的或转换而成的三角形网格。

4. 如权利要求1所述的方法,其中所述多边形网格包括原始的或转换而成的三角形网格,并且所述分区包括:基于根据与所述生成式设计过程的准确度相关联的生成式设计信息确定的关联数据,将三角形分配到所述第一部分。

5. 如权利要求4所述的方法,其中所述生成式设计信息包括距离信息,并且所述分配包括:基于三角形的顶点与所述一个或多个输入实体之间的阈值距离,将所述三角形分配到所述第一部分,其中当三角形的顶点由输入实体包含或包含在所述输入实体的曲面的所述阈值距离之内时,所述顶点被视为与所述输入实体关联,并且所述阈值距离对应于由所述生成式设计过程创建的生成式设计的所述三角形网格的表示的离散化准确度。

6. 如权利要求4所述的方法,其中当三角形具有未被确定为与输入实体关联的至少一个顶点时,将所述三角形分配到第二部分。

7. 如权利要求4-6中任一项所述的方法,其中所述分区包括:

检查(i)位于所述第一部分与第二部分之间的边界上并且(ii)连接位于所述第一部分与第二部分之间的所述边界上的多于两个边界边的任何非流形边界顶点;

将包括此类非流形边界顶点的一个或多个关联三角形从所述第一部分重新分配到所述第二部分;以及

迭代地重复所述检查和所述重新分配,直到无非流形边界顶点剩余为止。

8. 如权利要求1-6中任一项所述的方法,其中所述分区包括:通过以下方式来松弛由位于所述第一部分与所述第二部分之间的边界上的边界边形成的边界形状:至少部分地使边界顶点位置朝向其平均值移位以减小边界形状的角度和长度偏差。

9. 如权利要求1-6中任一项所述的方法,其中所述构造包括:

对具有平坦内曲面角的任何边界顶点添加正则约束条件;

沿着位于所述第一部分与所述第二部分之间的边界上的边界边应用边界曲线切线方向传播;

应用与各向异性区域中的主曲率对准、根据局部曲率进行缩放、量化以获得映射图像的四边形分区的全局连续映射计算方法;

应用全局映射松弛以改进全局四边形分区的平滑度;以及

应用包含所述网格的所述第二部分的逼近误差的全局曲面逼近方法。

10. 如权利要求1-6中任一项所述的方法,其中所述修改包括:

通过以下方式将所述一个或多个可编辑平滑曲面的至少一个边界朝向所述一个或多个输入实体中的至少一者拉动:对针对所拉动边界评估的所述输入实体的距离函数应用梯度下降方法;

基于以下的准确度限制为所述修改设定安全公差值:(i) 由所述修改采用的求交算法和/或(ii) 由所述生成式设计过程创建的所述生成式设计的所述网格的表示;以及

迭代地调整所述安全公差值以确保所述一个或多个经修改的平滑曲面与所述一个或多个输入实体的所述一个或多个接触曲线与所述未经修改的边界同胚。

11. 如权利要求10所述的方法,其包括:当所述至少一个边界的一个或多个区域的曲率超过阈值时,针对所述至少一个边界的所述一个或多个区域添加一个或多个光滑能量项。

12. 如权利要求1所述的方法,其中所述组合包括:使用对实体和定向薄片起作用的布尔运算,或使用元胞建模技术。

13. 如权利要求1所述的方法,其中所述计算机辅助设计程序包括在两个或更多个单独计算机处理器上配合地操作的两个或更多个程序。

14. 如权利要求1所述的方法,其中所述一个或多个输入实体包括两个或更多个输入实体,并且所述方法包括:

检测所述两个或更多个输入实体中的至少两者之间小于所述生成式设计过程的准确度的一个或多个间隙;以及

扩展所述两个或更多个输入实体中的所述至少两者,以填充所述一个或多个间隙。

15. 如权利要求1所述的方法,其包括:

标识所述一个或多个无间隙接触曲线中的在经修改的平滑曲面与输入实体之间不提供至少切线连续性的至少一者;以及

在所述一个或多个无间隙接触曲线中的所述至少一者处应用融合以在所述经修改的平滑曲面与所述输入实体之间提供至少切线连续性。

16. 如权利要求1所述的方法,其还包括:通过所述计算机辅助设计程序提供所述第二

三维模型,以用于在使用一个或多个计算机控制的制造系统来制造对应于所述对象的物理结构中使用。

17.如权利要求16所述的方法,其中所述提供包括:将所述第二三维模型保存到永久性存储装置,以用于在使用所述一个或多个计算机控制的制造系统来制造对应于所述对象的所述物理结构中使用。

18.如权利要求16所述的方法,其中所述一个或多个计算机控制的制造系统包括增材制造机器或减材制造机器,并且所述提供包括:

使用所述第二三维模型来针对所述增材制造机器或所述减材制造机器生成工具路径说明;以及

使用针对所述增材制造机器或所述减材制造机器生成的所述工具路径说明利用所述增材制造机器或所述减材制造机器来制造对应于所述对象的所述物理结构的至少一部分。

19.一种系统,其包括:

非暂时性存储介质,所述非暂时性存储介质具有存储在其上的计算机辅助设计程序的指令;以及

一个或多个数据处理设备,所述一个或多个数据处理设备能够运行所述计算机辅助设计程序的所述指令,以执行如权利要求1-17中任一项所述的方法。

20.如权利要求19所述的系统,其包括:一个或多个计算机控制的制造系统包括增材制造机器或减材制造机器,其中所述一个或多个数据处理设备能够运行所述计算机辅助设计程序的所述指令以根据所述第二三维模型针对所述增材制造机器或所述减材制造机器生成工具路径说明,并且使用所述工具路径说明利用所述增材制造机器或所述减材制造机器来制造对应于所述对象的所述物理结构的至少一部分。

21.一种非暂时性计算机可读介质,其对计算机辅助设计程序进行编码,所述计算机辅助设计程序能够操作来致使一个或多个数据处理设备执行如权利要求1-18中任一项所述的方法。

计算机辅助设计中生成式设计几何结构到可编辑且水密边界表示的转换

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求标题为“CONVERSION OF GENERATIVE DESIGN GEOMETRY TO EDITABLE AND WATERTIGHT BOUNDARY REPRESENTATION IN COMPUTER AIDED DESIGN”且于2018年11月9日提交的在先美国申请号62/758,053的优先权的权益,所述申请以引用方式整体并入本文。

背景技术

[0003] 本说明书涉及物理结构的计算机辅助设计,所述物理结构可使用增材制造、减材制造和/或其他制造系统和技术来制造。

[0004] 已开发了计算机辅助设计(CAD)软件并将其用于生成对象的三维(3D)表示,并且已开发了计算机辅助制造(CAM)软件并将其用于例如使用计算机数字控制(CNC)制造技术来制造那些对象的物理结构。通常,CAD软件使用边界表示(B-Rep)格式存储被建模的对象的几何结构的3D表示。在边界表示模型(B-Rep)中,相比于网格模型的离散且逼近的曲面,使用平滑且精确的数学曲面将几何结构存储在计算机中。

[0005] 此外,已经设计了CAD软件,以便对要制造的较大零件系统中的零件或一个或多个零件执行3D几何结构的自动生成(生成式设计)。这种3D几何结构的自动生成通常限于CAD软件的用户指定的设计空间,并且3D几何结构生成通常受设计目标和约束条件的控制,所述目标和约束条件可由CAD软件的用户或另一方定义并导入CAD软件中。设计目标(诸如使废弃材料或所设计零件重量最小化)可用于推动几何结构生成过程朝着更好的设计方向发展。设计约束条件包括单个零件的结构完整性约束条件(即,在零件使用期间零件在预期结构载荷下不得失效的要求)以及由较大系统施加的物理约束条件(即,在使用期间零件不会干扰系统中的另一个零件的要求)。此外,生成式设计过程的输入可包括一组输入实体(B-Rep输入),所述输入实体指定生成式设计过程的边界条件,但许多现代生成式设计求解器并不直接对其输入实体的确切曲面边界表示进行操作。作为替代,对B-Rep进行采样并且用体积表示(诸如水平集或四面体或六面体网格)进行替换,体积表示对于由求解器计算的物理模拟和材料合成而言明显更加方便且高效。

发明内容

[0006] 由于目标表示的限制,由生成式设计求解器将其输入实体转换为体积表示会引入曲面精度损失。图2示出这种示例,其中生成式网格分段200是从意图表示叠加的半透明实体205的水平集0等值面提取的。准确度损失在实体尖锐边210和孔215附近尤其明显。虽然此损失在求解器计算的上下文中可忽略不计,但一般来说它会阻止生成式设计的输出远离由求解器合成的有机材料而足够准确地表示输入实体曲面几何结构。随后,当将求解器输出集成到完整模型组件内时,这些曲面不准确度通常引起诸如零件干扰和制造缺陷或异常的问题。图3示出模型的两个版本300、320的这种示例。已被设计为装配穿过输入实体310的

孔的杆305在与根据本公开的生成式B-Rep组装在一起时恰当地装配,所述B-Rep可重复使用输入几何结构。相比之下,一般曲面重建325违反生成式约束条件,从而引起与杆的干扰330。注意,生成式设计几何约束条件可包括实体B-Rep(诸如输入实体310),并且被放置在 \mathbb{R}^3 优化域中,以避免与CAD组件中的其他零件的干扰(禁止型(keep-out))并指定与其他零件的附接点(允许型(keep-in))。

[0007] 为了解决生成式设计几何结构中的这些不准确性,本公开的全自动方法通过利用生成式求解器输入和表示来进行以下操作而将生成式设计转换成可编辑水密B-Rep:(1)在所述设计与所述输入一致的位置嵌入确切的输入实体边界曲面;(2)利用全局平滑可编辑“有机”曲面在所有其他位置逼近设计边界;并且(3)接合所有曲面以形成生成式设计输出B-Rep。图1示出过程的概述示例。输入实体100被提供到生成式设计求解器,所述生成式设计求解器将输入实体100转换为水平集表示,并且在此水平集表示上进行操作,以自动产生连接输入几何结构的新几何结构。新几何结构从水平集表示的0等值面提取,以产生提取网格110,所述提取网格110被分别分区成关联部分112和有机部分114。T样条曲面120是针对有机部分114构造的,并且最终输出水密B-Rep 130由输入实体100和有机T样条曲面120构成。

[0008] 注意,当前公开的方法适用于表示增材和减材的任意组合并利用求解器几何结构表示的生成式设计。此外,虽然以上示例引用T样条曲面120,但应了解,可在相应实现方式中使用一种或多种不同类型的可编辑平滑曲面表示。例如,针对有机部分114构造的曲面120可以是具有T型接头的非均匀有理Catmull-Clark曲面(T-NURCC)曲面120。可用于可编辑平滑曲面表示的几何格式的合适的变型可包括T-NURCC、T样条、LR B样条和/或分层B样条。此外,在与输入实体100合成以形成最终输出水密B-Rep130之前,最初构造的可编辑平滑曲面120可进行合并(在可能的情况下)以产生更简单的面片布局125。例如,最初构造的T样条和/或T-NURCC曲面120的面片可合并以产生T样条和/或T-NURCC曲面125,如图1所示。

[0009] 一般来说,本说明书中描述的主题的一个或多个方面可以一种或多种方法来体现,所述方法包括:在计算机辅助设计程序中获得要制造的对象的第一三维模型,其中所述第一三维模型包括通过生成式设计过程产生的多边形网格,所述生成式设计过程采用一个或多个输入实体作为所述生成式设计过程的优化域的一个或多个子空间,所述一个或多个输入实体呈边界表示格式;通过所述计算机辅助设计程序将所述多边形网格分区成与所述一个或多个输入实体关联的第一部分和与不与所述一个或多个输入实体关联的第二部分;通过所述计算机辅助设计程序针对所述多边形网格的所述第二部分构造一个或多个可编辑平滑曲面,其中所述一个或多个可编辑平滑曲面中的每一者具有允许全局平滑自由形式曲面编辑的全局平滑参数化;通过所述计算机辅助设计程序修改所述一个或多个可编辑平滑曲面的一个或多个边界,以在一个或多个接触曲线处接触所述一个或多个输入实体,所述一个或多个接触曲线与所述一个或多个经修改的平滑曲面与所述一个或多个输入实体之间的未经修改的边界同胚;以及通过所述计算机辅助设计程序组合所述一个或多个经修改的平滑曲面与所述一个或多个输入实体以形成所述要制造的对象的第二三维模型,其中所述第二三维模型包括在一个或多个无间隙接触曲线处与呈所述边界表示格式的所述一个或多个输入实体的一个或多个部分接触的所述一个或多个经修改的平滑曲面,其中所述第二三维模型是水密的,并且其中所述一个或多个无间隙接触曲线中的每一者和所述一个或

多个经修改的平滑曲面中的每一者能够使用自由形式建模操作来编辑。

[0010] 所述一个或多个可编辑平滑曲面是全局平滑的,因为它们的曲面参数化对于整个曲面都是平滑的。这与分段平滑(通常简称为平滑)形成对比,所述分段平滑意指存在曲面参数化的不连续性,这可引起法向或曲率形状不连续性。应了解,全局平滑曲面对于最终用户是优选的,因为它们允许更简单且更自然的编辑,其中平滑度在用户执行编辑时保持连续。因此,所述方法针对所述多边形网格的所述第二部分构造全局平滑曲面的能力在计算机辅助设计应用中提供重要价值。此外,所述一个或多个构造曲面可紧密地拟合到所述网格的所述第二部分,因为所述全局平滑曲面偏离所述网格不超过由所述应用指定的逼近公差,并且所述方法满足此约束条件的能力在计算机辅助设计应用中也具有重要价值。

[0011] 此外,所述第二三维模型的水密和可编辑特性同样提供重要价值。具有水密性意指在所述经修改的平滑曲面和所述全局平滑曲面与所述输入实体接触的位置不存在间隙。确保构造的(和经修改的)曲面与输入实体之间的接触曲线在所述边界表示格式中无间隙意指所述输入实体、从所述生成式设计的所述网格生成的所述曲面以及它们之间的所述接触都是能够使用标准计算机辅助设计和自由形式建模操作进行进一步编辑的。这有利于在计算机辅助设计应用的典型用户所采用的现有工作流程的情况下使用所述方法。

[0012] 将生成式设计转换为由所述输入实体的确切残余几何结构和可编辑(例如T-NURCC)曲面构成的水密B-Rep模型的这种过程避免了对依赖于用户技能的手动转换过程的需要。所述过程实现了这一目标,同时能够根据生成式设计几何约束条件处理任何合适数量的允许型和禁止型实体。此外,所产生的水密3D模型允许所述生成式设计易于在下游工作流程(例如,设置装配约束条件、模拟分析、执行参数编辑等)中使用,这可加快制造流程并可减少产品上市时间。因此,所公开的系统和技术使得工程师能够快速获得由多种算法、设置和迭代计算出的任何数量的生成式设计的可用CAD模型。

[0013] 所述生成式设计过程可采用体积(例如,四面体或六面体)网格方法、水平集方法或者未知或专有方法来创建对象的生成式设计(条件是表示方法准确度的距离是已知的)。多边形网格可以是与生成式设计的边界一致的原始的或转换而成的三角形网格。所述分区可包括:基于根据与所述生成式设计过程的准确度相关联的生成式设计信息确定的关联数据,将三角形分配到所述第一部分。例如,对于采用水平集方法的生成式设计过程,所使用的生成式设计信息可以是栅格元胞包含信息,并且所述方法可检查与所述栅格元胞相交的输入实体。一般来说,所述分区可包括:基于针对所述三角形的顶点确定的关联数据将三角形分配到所述第一部分,其中基于所述生成式设计过程所特有的计算和输入实体类型,将一些顶点确定为与一个或多个输入实体关联。此外,当三角形具有未被确定为与输入实体关联的至少一个顶点时,可将所述三角形分配到第二部分。

[0014] 所述多边形网格的每个顶点可基于处理水平集表示(当水平集方法用于生成式设计过程时)或基于采样(例如,在生成式设计过程开始时,体积网格的边界上的每个顶点可被分配为与曲面被采样以计算顶点位置的一个或多个输入实体关联)被分配为与一个或多个实体关联。此外,所述生成式设计信息可以是距离信息,并且所述分配可包括:基于三角形的顶点与所述一个或多个输入实体之间的阈值距离,将所述三角形分配到第一部分,其中当三角形的顶点由输入实体包含或包含在所述输入实体的曲面的所述阈值距离之内时,所述顶点被视为与所述输入实体关联,并且所述阈值距离对应于由所述生成式设计

过程创建的生成式设计的所述三角形网格的表示的离散化准确度,即使当生成式设计过程如何运行的细节未知、但生成式设计过程的准确度已知时也是如此。因此,可将每个顶点分配为与一个或多个实体关联,所述实体在距实体边界的距离阈值内包含所述顶点,其中所述距离阈值等于生成式设计过程的已知准确度。

[0015] 所述可分区包括:检查(i)位于所述第一部分与所述第二部分之间的边界上并且(ii)连接位于所述第一部分与所述第二部分之间的所述边界上的多于两个边界边的任何非流形边界顶点;将包括此类非流形边界顶点的一个或多个关联三角形从所述第一部分重新分配到第二部分;以及迭代地重复所述检查和所述重新分配,直到无非流形边界顶点剩余为止。此外,所述分区可包括:通过以下方式来松弛由位于所述第一部分与所述第二部分之间的边界上的边界边形成的边界形状:至少部分地使边界顶点位置朝向其平均值移位以减小边界形状的角度和长度偏差。

[0016] 所述一个或多个可编辑平滑曲面可以是一个或多个T样条曲面,并且所述构造可包括:对具有平坦内曲面角的任何边界顶点添加正则约束条件;沿着位于所述第一部分与所述第二部分之间的边界上的边界边应用边界曲线切线方向传播;应用与各向异性区域中的主曲率对准、根据局部曲率进行缩放、量化以获得映射图像的四边形分区的全局连续映射计算方法;应用全局映射松弛以改进全局四边形分区的平滑度;以及应用包含所述网格的所述第二部分的逼近误差的全局T样条曲面逼近方法。应用全局T样条曲面逼近方法具体可涉及:在应用指定的逼近公差内,在所述网格的所述两个部分之间的边界处包含所述网格的所述第二部分的逼近误差。

[0017] 所述修改可包括:通过以下方式将所述一个或多个可编辑平滑曲面的至少一个边界朝向所述一个或多个输入实体中的至少一者拉动(包括将所述边界拉入由所述输入实体包含的空间内部):针对所拉动边界评估的所述输入实体的距离函数应用梯度下降方法;基于以下的准确度限制为所述修改设定安全公差值:(i)由所述修改采用的求交算法和/或(ii)由所述生成式设计过程创建的所述生成式设计的所述三角形网格的表示;以及迭代地调整所述安全公差值以确保所述一个或多个经修改的平滑曲面与所述一个或多个输入实体的所述一个或多个接触曲线与所述未经修改的边界同胚。所述组合可包括:使用对实体和定向薄片起作用的布尔运算,或使用元胞建模技术。

[0018] 所述计算机辅助设计程序可包括在两个或更多个单独计算机处理器上配合地操作的两个或更多个程序。所述方法可还包括:通过所述计算机辅助设计程序提供所述第二三维模型,以用于在使用一个或多个计算机控制的制造系统来制造对应于所述对象的物理结构中使用。所述提供可包括:将所述第二三维模型保存到永久性存储装置,以用于在使用所述一个或多个计算机控制的制造系统来制造对应于所述对象的所述物理结构中使用。所述一个或多个计算机控制的制造系统可包括增材制造机器,并且所述提供可包括:使用所述第二三维模型来针对所述增材制造机器生成工具路径说明;以及使用针对所述增材制造机器生成的所述工具路径说明利用所述增材制造机器来制造对应于所述对象的所述物理结构的至少一部分。

[0019] 本说明书中所述主题的一个或多个其他方面可以一个或多个系统体现,所述一个或多个系统包括:非暂时性存储介质,所述非暂时性存储介质具有存储在其上的计算机辅助设计程序的指令;以及一个或多个数据处理设备,所述一个或多个数据处理设备能够运

行所述计算机辅助设计程序的所述指令,以执行任何所述方法。所述一个或多个系统可包括增材制造机器,其中所述一个或多个数据处理设备能够运行所述计算机辅助设计程序的所述指令以根据所述第二三维模型针对所述增材制造机器生成工具路径说明,并且使用所述工具路径说明利用所述增材制造机器来制造对应于所述对象的所述物理结构的至少一部分。此外,本说明书中所述的主题的一个或多个方面可以对计算机辅助设计程序进行编码的一个或多个非暂时性计算机可读介质体现,所述计算机辅助设计程序能够操作来致使一个或多个数据处理设备执行任何所述方法。

[0020] 本说明书中所述的主题的特定实施方案可被实施来实现以下优点中的一者或多者。不是使用直接处理输入实体B-Rep并输出受限类型的B-Rep几何结构(例如,晶格结构)而不是网格的专门求解器,而是可使用产生网格输出的更多元化生成式设计求解器,这提供生成针对任意物理标准进行优化的更多变且可用形状的能力。此外,可避免违反允许型和禁止型约束条件,通常是由于将生成式设计网格转换为全局平滑的细分或样条曲面的不受限全局逼近方案而产生的,并且可避免用单独应用的布尔运算来修复此类违反的需要,应用所述运算来解决此类问题是不可靠的,并且产生不良质量结果。因此,可产生用于生成式设计的新且独特的几何结构,以满足各种各样的设计要求,而无需用户输入或编辑,其中新的几何结构与提供到生成式设计过程的输入几何结构平滑连接。

[0021] 使用本文所述的系统和技术将生成式设计网格转换为可编辑水密B-Rep可促进生成式设计的3D模型的下游编辑和处理(例如,内圆角或壳操作),其中此类下游编辑和处理通常需要精确的数学几何结构,并且无法与已通过B-Rep嵌入的生成式设计网格有效地工作。此外,转换过程可以是全自动的,因为无需手动操作即可将输入实体的平滑曲面与处理后的网格几何结构对准,以产生准确地表示生成式设计中的残留输入实体曲面(即使是通常出现在生成式设计中的复杂的特征丰富的形状)的几何结果。这节省设计过程中的时间,从而通过减少创建最终可制造设计的成本来促进生成式设计技术的使用。

[0022] 本说明书中所述的主题的一个或多个实施方案的细节在附图和以下描述中阐述。根据描述、附图和权利要求书,本发明的其他特征、方面和优点将变得显而易见。

附图说明

[0023] 图1示出产生可编辑水密B-Rep的生成式设计过程的概述示例。

[0024] 图2示出生成式设计求解器如何由于目标表示的限制而引入曲面精度损失的示例。

[0025] 图3示出这种曲面精度损失以及这如何能够引起零件干扰的另一个示例。

[0026] 图4示出产生最终生成式B-Rep的简单生成式模型的概述示例。

[0027] 图5A、图5B和图5C示出来自允许型实体、禁止型实体和种子型实体的2D水平集关联的概述示例。

[0028] 图6示出针对图1的输入实体构造的网格子集的示例。

[0029] 图7示出如何消除非流形边界顶点的示例。

[0030] 图8示出产生有机曲面与输入实体之间的高质量接触几何结构的边界松弛的示例。

[0031] 图9示出使用本公开的全自动方法生成的高属(88和54)生成式设计B-Rep的示例。

- [0032] 图10示出具有平坦内曲面角的边界顶点的示例。
- [0033] 图11示出对具有平坦内曲面角的所有边界顶点添加正则约束条件并应用边界切线方向传播之后的边界松弛的示例。
- [0034] 图12示出产生同胚曲线的拉动修改之前和之后的有机边界曲面的示例。
- [0035] 图13示出用于构成水密B-Rep的过程的示例。
- [0036] 图14是包括数据处理设备的数据处理系统的示意图。
- [0037] 图15示出用于将网格几何结构转换为要制造的对象的水密边界表示的过程的示例。
- [0038] 图16示出通过CAD实体模型的拓扑优化而生成的分区网格几何结构的过程的示例,其中消除了非流形边界顶点。
- [0039] 图17示出分区网格几何结构、针对网格几何结构的有机部分构造一个或多个可编辑平滑曲面以及修改一个或多个可编辑平滑曲面的一个或多个边界的过程的示例。
- [0040] 各种附图中的相同参考数字和名称指示相同元件。

具体实施方式

[0041] 1-概述

[0042] 本公开的全自动方法可将生成式求解器输入实体B-Rep(称为“输入实体”或表示为 $\{S_i\}$)和表示生成式设计(\mathbf{G})的输出网格(\mathbf{M})作为输入。为了将 \mathbf{M} 链接到 $\{S_i\}$,也可处理中间求解器表示(例如,水平集或体积网格)。替代地,可替代地供应求解器表示准确度误差(例如,水平集体素栅格边长度)。

[0043] $\{S_i\}$ 指定优化域的子空间。 ∂S_i 表示实体边界曲面,并且 S_i° 表示实体边界内部。 $\{S_i\}$ 可以是以下类型:允许型(S_i 完全被生成式设计所包含,即 $S_i \subset \mathbf{G}$)、禁止型 S_i° 在生成式设计 \mathbf{G} 以外; ∂S_i 可重叠)或种子型(S_i 完全或部分地在生成式设计 \mathbf{G} 以内)。

[0044] 相同类型的重叠输入实体合并,因此在不失一般性的情况下,对于相同类型的每一*i, j*, $S_i \cap S_j = \emptyset$ 。所有输入实体(即,与类型无关)的并集表示为 $\mathbf{S} = \cup S_i$ 。 $\mathbf{M} = \{\mathbf{V}, \mathbf{E}, \mathbf{T}\}$ 是逼近 \mathbf{G} 的封闭2流形网格,其中 $\mathbf{V} = \{V_i\}$ 、 $\mathbf{E} = \{E_i\}$ 、 $\mathbf{T} = \{T_i\}$ 分别是网格顶点、边和三角形。如果提供非三角形网格,则可将四边形和一般多边形进行三角剖分以形成三角形网格。

[0045] 本公开的全自动方法的一些实施方案如下工作:(1)将生成式设计网格分区成两个子集(区域):关联子集和有机子集,其中关联子集(区域)对应于输入实体曲面,并且有机子集(区域)对应于生成式合成曲面;(2)用全局平滑且紧密拟合的可编辑“有机”曲面来逼近有机子集(区域);并且(3)通过组合输入曲面和有机曲面来构成水密B-Rep。

[0046] 图4示出产生最终生成式B-Rep的简单生成式模型的概述示例。接收输入实体400和输入生成式网格405,并且将输入生成式网格405分区成网格分区410。这可能涉及从 \mathbf{M} 到输入B-Rep $\{S_i\}$ 的构建和关联关系 \mathbf{I} ,以及使用 \mathbf{I} 来确定 \mathbf{M} 中对应于每个 S_i 的元素。针对网格分区410的有机部分412生成一个或多个有机T样条曲面415(或呈合适的可编辑/局部可细化平滑曲面格式(例如,T-NURCC)的另一个曲面类型)。这可涉及通过松弛有机区域与关联区域之间的边界来逼近分区的网格410的有机区域412、计算有机区域的交叉、大小和场引

导的四边形参数化以及构造逼近有机区域412的平滑曲面 $\{O_i\}$ 。最终生成式B-Rep模型420由一个或多个所构造有机平滑曲面415和输入实体400构成。这可涉及拉动 \mathbf{S} 的内部中的 $\{O_i\}$ 的边界、构造 $\{O_i\}$ 与 $\{S_i\}$ 之间的接触曲线以及由 $\{O_i\}$ 和 $\{S_i\}$ 构成水密B-Rep。

[0047] 2-网格分区

[0048] 来自生成式设计求解器的输出网格 \mathbf{M} 被分区成一对不相交三角形子集 $\mathbf{T} = \mathbf{C} \cup \mathbf{O}$ ，其中 \mathbf{C} 表示 \mathbf{M} 中的输入实体B-Rep，并且 \mathbf{O} 表示由求解器合成的“有机”材料的边界曲面。注意， \cup 表示不相交集的并集。为了计算这种分区，使用求解器几何结构表示来构建关联关系 $(\mathbf{I}: \mathbf{M} \rightarrow \mathcal{P}(\{S_i\}))$ ，其中 $\mathcal{P}(\{S_i\})$ 是 $\{S_i\}$ 的幂集，并且 \mathbf{I} 可将网格映射到零个、一个或多个输入实体。

[0049] 2.1-关联数据

[0050] 构造将生成式网格链接到输入实体的关联数据（“关联”）。关联被存储为每个网格顶点（被视为代表输入实体曲面）的一个或多个属性。顶点可与多个输入实体关联。

[0051] 值得注意的是，不需要将代表顶点精确地放置在一个或多个关联输入曲面上。当顶点位置在生成式求解器B-Rep离散化准确度（例如，水平集网格边大小）内移位时，本公开的方法鲁棒地执行。

[0052] 关联数据构造根据求解器内部表示输入实体的方式而有所变化。提出了针对两种常见求解器表示的关联提取方法：水平集和体积网格。此外，描述了基于回退距离的算法，所述算法可在提供了关联距离的情况下应用于任何生成式输出网格。

[0053] 2.1.1-水平集关联

[0054] 水平集是用于生成式设计的最流行当代表示之一，在研究工作 (Van Dijk, N.P., Maute, K., Langelaar, M. 和 Van Keulen, F. 的 Level-set methods for structural topology optimization: a review, Structural and Multidisciplinary Optimization 48, 3, 437-472, 2013) 和 CAD 行业 (Autodesk Dreamcatcher, Project Dreamcatcher, Autodesk Research, <https://autodeskresearch.com/projects/dreamcatcher>) 中都有所使用。求解器输出 \mathbf{M} 是通过使用以下轮廓算法逼近0等值面 $\partial \bar{\mathbf{G}}$ 来提取的（诸如 Lorensen, W.E. 和 Cline, H.E. 的 Marching Cubes: a High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, Proc. of ACM SIGGRAPH 87, 163-170, 1987; Kobbelt, L., Botsch, M., Schwanecke, U. 和 Seidel, H.-P. 的 Feature Sensitive Surface Extraction from Volume Data, Proc. of ACM SIGGRAPH 01, 57-66, 2001; Ju, T., Lassasso, F., Schaefer, S. 和 Warren, J. 的 Dual Contouring of Hermite Data, Proc. of ACM SIGGRAPH 02, 339-346, 2002 中），其中 $\bar{\mathbf{G}}$ 是生成式设计的水平集表示。每个网格顶点位置是通过组合包含顶点的水平集栅格元胞的拐角位置来计算的。

[0055] 网格顶点关联被如下构造为栅格元胞拐角关联的并集：(1) 构造每个栅格点 g_k 的关联集 $\mathbf{I}(g_k) = \{S_i \mid g_k \in S_i\}$ 。“实体点”测试使用标准射线-曲面求交计数算法 (Chen, M. 和 Townsend, T. 的 Efficient and Consistent Algorithms for Determining the Containment of Points in Polygons and Polyhedra, EG 1987-Technical Papers, Eurographics Association, 1987)。为了提高效率，仅需要测试参与网格提取的网格点

(即,与 $\partial\bar{G}$ 相交的元胞的窄带的拐角点);(2)如果针对种子 S_i 为 $g_k \in \bar{G} \wedge \mathbb{I}(g_k) = \{S_i\}$,则 g_k 周围的体积已从 \bar{G} 侵蚀,然后设定 $\mathbb{I}(g_k) = \{\varepsilon_i\}$,其中 $\varepsilon_i \subseteq S_i$ 是 S_i 的“侵蚀”子集;并且(3)针对具有拐角 $\{g_{j,k}\}_{k=0}^7$ 的栅格元胞 G_j 中提取的每个 V_i ,通过合并元胞拐角的关联来构造关联集 $\mathbb{I}(V_i) = \cup_{k=0}^7 \mathbb{I}(g_{j,k})$.

[0056] 图5A、图5B和图5C示出来自以下三个输入实体的2D水平集关联的概述示例{A,B,C}:允许型实体505(使用短划线表示)、种子型实体510(使用点划线表示)和禁止型实体515(使用双点划线表示)。关联属性被分配到实体上或内部的栅格点,如图5A所示。通过求解器添加有机材料(O)并且减少种子型实体材料(E),如图5B中栅格点上所示(栅格使用点线表示)。栅格顶点属性在图5C中的520处传播到从每个栅格元胞提取的网格顶点(实线表示求解器输出的边界,其中较粗实线对应于所添加有机材料)。注意,从纯加性有机元胞提取的顶点不具有关联属性。

[0057] 2.1.2-体积网格关联

[0058] 体积网格(例如,四面体和六面体网格)是另一种常用生成式设计表示,尤其普及于拓扑优化应用(Brackett,D.、Ashcroft,I.和Hague,R.的Topology optimization for additive manufacturing,Proceedings of the solid freeform fabrication symposium,Austin,TX,348-362,2011;Chen,X.、Peng,D.和Gao,S.的SVM-Based Topological Optimization of Tetrahedral Meshes,Proceedings of the 21st International Meshing Roundtable,Springer Berlin Heidelberg,Berlin,Heidelberg,211-224,2013)。从体积网格 \bar{G} 提取关联数据很简单,因为 $\mathbf{M} \equiv \partial\bar{G}$ 。令 $\mathbf{K} \subseteq \mathbf{S}$ 为输入允许型实体和种子型实体的并集。 \bar{G} 是通过 \mathbf{K} 的分段线性采样来初始化(即, $\bar{G} \cong \mathbf{K}$)。因此,最初 $\mathbf{M} \cong \partial\mathbf{K}$ 。在初始化期间,设定 $\forall V_i \in \mathbf{V}$ 的关联属性为 $\mathbb{I}(V_i) = \{S_j\}$,其中 $\partial S_j, S_j \subseteq \mathbf{K}$ 为被采样以获得 V_i 的位置的输入实体边界。对于尚未由求解器侵蚀或添加的所有顶点,这些属性在 \bar{G} 的生成式优化期间持续存在并且根据最终 $\mathbf{M} \equiv \partial\bar{G}$ 恢复。

[0059] 2.1.3-距离关联

[0060] 所提供的生成式设计可不基于体积优化,或者内部几何结构表示可为不可用或专有。在此类情况下,可在给定距离 $d > 0$ 的情况下构造关联数据,所述距离表示下层求解器表示的准确度公差。

[0061] 在此类情况下,关联数据如下构造: $\forall V_i \in \mathbf{V}$ 并且 $\forall S_j$,计算 $D_j(V_i)$,其中 $D_j(\cdot)$ 是 ∂S_j 的带符号距离函数,对于 $p \in S_j, D_j(p) \leq 0$ 。接下来,设定 $\mathbb{I}(V_i) = \{S_j | D_j(V_i) \leq d\}$ (即,在其曲面的 d 以内包含 V_i 的输入实体的子集)。如果对于种子 $S_j, \mathbb{I}(V_i) = \{S_j\} \wedge D_j(V_i) < -d$,则设定 $\mathbb{I}(V_i) = \{S_j, \varepsilon_i\}$ 或 \emptyset 。对于大 $|\mathbf{V}|$ 和 $|\{S_i\}|$,则用于邻近搜索的 \mathbf{S} 的限制层次结构可进行预先计算,以提高效率(Ehmann,S.A.和Lin,M.C.的Accurate and Fast Proximity Queries Between Polyhedra Using Convex Surface Decomposition,Computer Graphics Forum 20,3,2001;Alliez,P.、Tayeb,S.和Wormser,2018,3D Fast Intersection and Distance Computation,CGAL User and Reference Manual,CGAL Editorial Board.2018;

Siemens, Collision Detection Manager (D-Cubed CDM) -SiemensPLM Software, <https://www.plm.automation.siemens.com/en/products/open/d-cubed/cdm/index.shtml>。

[0062] 2.2-分区

[0063] 关联数据如下扩展为网格三角形:如果三角形的所有三个顶点 $T_i = \{V_i, V_j, V_k\}$ 与某个或某些实体关联,则构造三角形关联 $I(T_i) = I(V_i) \cup I(V_j) \cup I(V_k)$ 。否则,设定 $I(T_i) = \emptyset$ 。值得注意的是,如果三角形具有的至少一个顶点是有机的,则即使另一顶点与实体关联,整个三角形也被视为有机的。

[0064] 根据三角形关联,构造对应于每个输入实体 $S_i \leftrightarrow C_i = \{T_i | T_i \in T \wedge S_i \in I(T_i)\}$ 的网格子集。图6示出针对图1的输入实体100构造的网格子集600的示例。值得注意的是,如果 $\partial S_i \cap \partial S_j \neq \emptyset$,则 $C_i \cap C_j \neq \emptyset$ 。并且如果 S_i 由有机材料消耗,则 $C_i = \emptyset$ 。接下来,关联 $C = \cup C_i$ 部分和有机 $O = T \setminus C$ 部分被构造来完成分区 $T = C \cup O$ 。

[0065] 2.3-有机部件

[0066] 如果一对三角形 T_i 和 T_j 共享边 $E_k = T_i \cap T_j$,则它们是边连接的。最小分区 $\cup O_i = O$ 的元素 $\{O_i\}$ 在不相交的边路径连接的子集中称为 O 的有机部件。此分区是通过边连接进行的“泛洪填充”来简单计算的。

[0067] 3-有机边界

$$[0068] \quad B = \{E_i | E_i = T_j \cap T_k \wedge [(T_j \in C \wedge T_k \in O) \vee (T_j \in O \wedge T_k \in C)]\} \subset E$$

[0069] 是分离 O 和 C 的边的子集。因此, B 称为有机边界,并且其元素称为有机边界边,或仅称为边界边:由于 M 根据定义是封闭的,因此这种速记符号并不模糊。

[0070] 3.1-边界顶点

[0071] 如果两个边 E_i 和 E_j 共享顶点 $V_k = E_i \cap E_j$,则它们是连接的。如果 $E_i \in B \wedge E_j \in B$,则 V_k 称为边界。大多数边界顶点连接单一对边界边,并且称为2流形。然而,有时存在顶点 V_k 连接多对边界边(即 V_k 是非流形边界顶点)的分区。此类顶点在下游处理中引入了复杂性,这应通过特殊情况处理来解决。

[0072] 图7示出如何消除非流形边界顶点705的示例;通过稍微更改分区以仅产生流形顶点710来修复构型。对于所有非流形顶点 $\{V_k\}$,将所有关联三角形 $\{T_j | T_j \cap \{V_k\} \neq \emptyset \wedge T_j \in C\}$ 重新分配到 O 。 $\{V_k\}$ 不再是边界,但现在应重新计算有机部件分区 $\cup O_i = O$,因为重新分配的三角形在 O 中引入新边连接,所述新边连接可连接先前断开的子集。此过程可进行迭代,直到所有边界顶点变为2流形为止。通常,只需几次迭代来完成过程。此外,由于最终将整个网格重新分配到有机区域,因此也确保病理输入数据的收敛性。

[0073] 3.2-边界曲线

[0074] 考虑到路径连接的不相交子集中最小有机边界分区 $\cup B_i = B$ 的元素 $\{B_i\}$,为了计算 $\{B_i\}$,使用任意未处理边界边作为种子来跟踪顶点连接。当关闭跟踪的边序列时,算法将完成当前子集 B_i 。此构造表明 $\{B_i\}$ 表示封闭的分段线性曲线,并且称为分区 $T = C \cup O$ 的边界曲线。

[0075] 3.3边界松弛

[0076] 接下来,作为进一步处理的先决条件,可松弛边界曲线 $\{B_i\}$ 的形状,以减少相邻边界边之间的粗糙度和长度差。此步骤对于获得高质量、更简单的四边形图非常重要,这进而导致输出有机曲面的可编辑性提高。

[0077] 分段线性松弛的无限制版本是众所周知的曲线平滑化(Chaikin,G.M.的An algorithm for high speed curve generation,ComputerGraphics and Image Processing20,3,346-349,1974;Taubin,G.的A signal processing approach to fair surface design,Proc.of ACM SIGGRAPH 95,351-358,1995)。然而,为了避免由此类算法引起的形状收缩,曲线松弛限于 M 的曲面,并且工作如下,概括为(1)重新网格分区和(2)平滑化:

[0078] (1)自适应地将 B 周围的小三角形通道重新网格化,以减小相邻边界边长度差。通道可包括处于边界顶点的两个环邻域中的所有三角形,但是替代定义也可适用。通过应用曲率自适应算法(例如,如在Alliez,P.、Ucelli,G.、Gotsman,C.和Attene,M.的Recent Advances in Remeshing of Surfaces,2005中所述)来进行重新网格分区并细化相邻网格三角形以适应变化。

[0079] (2)通过应用曲面限制曲线平滑化算法(例如,如在美国公开号2013/0300735中所述)来平滑化 B ,所述算法通过使边界顶点位置朝向其平均值移位来迭代地减少边界曲线的角度和长度偏差。

[0080] 注意,重新网格分区的步骤未严格要求,但它可产生更好的松弛结果,这主要是因为改进的网格采样显著减少相邻边界边长度差。

[0081] 图8示出产生有机曲面与输入实体之间的高质量接触几何结构的边界松弛的示例。松弛之前的输入网格805具有高曲率有机边界分段810。松弛之后的高曲率有机边界分段815具有减小的相邻边界边长度差。最后,输入实体800被示出为具有针对松弛的输入网格805构造的有机曲面820(例如,T样条曲面)。

[0082] 4-有机曲面

[0083] 接下来,呈现一组可编辑平滑曲面 $\{O_i\}$ 的构造,每个有机部件 $\{O_i \mid \cup O_i = O\}$ 一个曲面。由于所公开主题的全自动方法对每个部件 $O_i \rightarrow O$ 相同地应用,因此省略部件索引 f 以简化说明。

[0084] 所使用的可编辑曲面表示可以是T样条和/或T-NURCC(Sederberg,T.W.、Zheng,J.、Bakenov,A.和Nasri,A.的T-splines and T-NURCCs,Proc.of ACM SIGGRAPH 03,477-484,2003)。T样条提供覆盖所表示形状的 C^2 连续四边形面片 $\{Q_i\}$ 的映射图集以及全面定义曲面几何结构的符合四边形控制网格 Q 。映射图集可用于应用通用CAD算法(诸如曲面-曲面求交),而四边形控制网格是由行业设计师采用的最流行有机形状编辑工具之一。

[0085] T样条能够在不重新参数化的情况下进行局部T形接头插入(Sederberg,T.W.、Cardon,D.L.、Finnigan,G.T.、North,N.S.、Zheng,J.和Lyche,T.的T-spline simplification and local refinement,Proc.of ACM SIGGRAPH 04,276-283,2004)。因此,与 Q 的偏差可通过仅在需要时添加另外的自由度而高效地减小(Li,W.-C.、Ray,N.和

Levy, B.的Automatic and Interactive Mesh to T-Spline Conversion, Proc. of the Symposium on Geometry Processing, 191-200, 2006)。对于不需要T样条的应用, 可使用逐面片逼近将输出曲面转换为 G^1/G^2 连续非均匀有理基础样条(NURBS)网络, 或者通过扩展全部T形接头转换为 C^2 Catmull-Clark细分曲面(Catmull, E.和Clark, J.的Recursively generated B-spline Surfaces on arbitrary topological meshes, Computer Aided Design 10, 6, 350-355, 1978)。

[0086] 也可使用T-NURCC, 并提供以下可用性质: (1) 曲面由四边形控制网格定义, 所述四边形控制网格是行业设计师采用的非常流行的形状编辑工具; (2) 局部细化(Sederberg, T. W.、Cardon, D. L.、Finnigan, G. T.、North, N. S.、Zheng, J.和Lyche, T.的T-spline simplification and local refinement, Proc. of ACM SIGGRAPH 04, 276-283, 2004) 通过仅在需要时添加控制点来实现误差减小(Li, W. -C.、Ray, N.和Levy, B.的Automatic and Interactive Mesh to T-Spline Conversion, Proc. of the Symposium on Geometry Processing, 191-200, 2006; Wang, Y.和Zheng, J.的Adaptive T-spline surface approximation of triangular meshes, 6th International Conference on Information, Communications and Signal Processing, ICICS, IEEE, 1-5, 2007); (3) 通用CAD算法(例如, 求交、偏移) 可将几何结构作为 C^2 连续四边形面片的图集访问; 以及(4) 可将曲面容易地转换为 G^1 连续NURBS网络, 以便导出到传统CAD格式。

[0087] 为了获得适合于定义有意义对齐的控制网格(例如, 通过拟合T样条曲面)的有机形状的四边形图集(或四边形分区), 可计算量化的全局参数化(诸如整数栅格图(IGM)) (Bommes, D.、Campen, M.、Ebke, H. -C.、Alliez, P.和Kobbelt, L.的Integer-grid maps for reliable quad meshing, ACM Transactions On Graphics 32, 4, 1, 2013; Campen, M.、Bommes, D.和Kobbelt, L.的Quantized global parametrization, ACM Transactions on Graphics 34, 6, 1-12, 2015): $\phi: \mathbb{O} \rightarrow \Omega \subset \mathbb{R}^2$ 。此图具有以下重要性质:

[0088] (1) 无需为生成式设计中通常存在的高属有机形式指定切割网络。(图9示出使用本公开的全自动方法生成的高属(88和54)生成式设计B-Rep的示例900、910。) 而是, 仅需要少量的圆锥奇点(Ray, N.、Li, W. C.、Levy, B.、Sheffer, A.和Alliez, P.的Periodic Global Parameterization, ACM Trans. Graph., ACM, 1460-1485, 2006), 所述圆锥奇点可从平滑的曲率张量对齐的交叉场获得(Bommes, D.、Zimmer, H.和Kobbelt, L.的Mixed-integer quadrangulation, ACM Transactions on Graphics 28, 2009)。

[0089] (2) 映射奇点被映射到整数点, 并且图像边界 $\phi: \mathbb{B} \rightarrow \partial\Omega$ 由整数等值线组成, 这允许提取四边形分区 $\{Q_i | \cup Q_i = \Omega, Q_i \cap Q_j = \emptyset\}$ (Bommes, D.、Campen, M.、Ebke, H. -C.、Alliez, P.和Kobbelt, L.的Integer-grid maps for reliable quad meshing, ACM Transactions on Graphics 32, 4, 1, 2013)。

[0090] (3) 通过计算平滑交叉场, 可将四边形网格边沿着形状主曲率对齐(Bommes, D.、Zimmer, H.和Kobbelt, L.的Mixed-integer quadrangulation, ACM Transactions on Graphics 28, 2009)。

[0091] (4) 通过指定自适应大小字段, 可高效地表示包含大小差异很大的特征的形状。

[0092] 配备有 $\phi: \mathbb{O} \rightarrow \Omega$ 及其倒数 $\phi^{-1}: \Omega \rightarrow \mathbb{O}$, 接下来呈现有机T样条曲面拟合 \mathbb{O} 的构造。

[0093] 4.1-交叉场

[0094] 构建有机T样条曲面拟合 \mathbb{O} 的第一步是指定有机曲面可编辑四边形控制网络的期望边方向。如在Alliez, P.、Cohen-Steiner, D.、Devillers, O.、Levy, B. 和Desbrun, M. 的 Anisotropic polygonal remeshing, Proc. of ACM SIGGRAPH03, 485-493, 2003 中所示, 沿着主曲率方向 (远离各向同性点) 采样的边与人工设计的控制网格紧密匹配, 提供最佳逼近, 自然地表示对称性, 并且在用作曲面编辑工具时允许有意义的形状变形。因此, 遵循已建立的混合间隔四边形剖分 (MIQ) 方法 (Bommes, D.、Zimmer, H. 和Kobbelt, L. 的 Mixed-integer quadrangulation, ACM Transactions on Graphics 28, 2009; 美国专利公布号 2012/0029882), 计算与 \mathbb{O} 上的主曲率方向匹配 (远离各向同性区域) 的全局平滑交叉场, 以指定四边形网络的期望边方向。替代曲率对齐的交叉场计算算法 (例如, Knöppel, F.、Crane, K.、Pinkall, U. 和 Schröder, P. 的 Globally optimal direction fields, ACM Transactions on Graphics 32, 2013) 也在这个阶段适用。为了估算 \mathbb{O} 上的曲率张量, 应用了“受限 Delaunay 三角剖分和正态周期”中的方法 (Cohen-Steiner, D. 和 Morvan, J.-M. 的 Restricted Delaunay triangulations and normal cycle, 19th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom., 237-246, 2003), 但其他网格曲率估算方法也可适用 (例如, Meyer, M.、Desbrun, M.、Schröder, P. 和 Barr, A.H. 的 Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds, H.-C. Hege 和 K. Polthier 编辑的 Visualization and Mathematics III, Springer-Verlag, Heidelberg, 35-57, 2003; Cazals, F. 和 Pouget, M. 的 Estimating differential quantities using polynomial fitting of osculating jets, Computer Aided Geometric Design 22, 121-146, 2005; Grinspun, E.、Gingold, Y.、Reisman, J. 和 Zorin, D. 的 Computing discrete shape operators on general meshes, Computer Graphics Forum 25, 547-556, 2006)。

[0095] 计算出的交叉场由表示期望四边形边对齐的一对正交方向 $\forall \mathbf{v}_i \in \mathbb{O}$ 组成, 并且包含分配到场流分叉的顶点的少量奇点。由于奇点破坏四边形边流, 从而影响了 \mathbb{O} 的可编辑性, 因此进行一些调整以减小它们在 \mathbb{B} 处的数量。

[0096] 首先, 对具有“平坦”内曲面角 $\left\{ \mathbf{v}_i \mid \frac{\pi}{2} < \angle(\mathbf{v}_i) < \frac{3\pi}{2} \right\}$ 的所有边界顶点添加正则约束条件, 以防止计算将奇点置于其上。由于在第3.3节中执行的边界松弛步骤, 违反此条件的顶点非常少而分散。图10示出具有平坦内曲面角的边界顶点1005的示例。

[0097] 其次, 在沿着 \mathbb{B} 的小通道中应用边界曲线切线方向传播, 从而替换估计的主曲率方向。这通过将交叉场与通道内的边界方向对齐来增强边界结构。通道大小自动地设置为匹配预期局部控制网格边长度。

[0098] 图11示出对具有“平坦”内曲面角的所有边界顶点添加正则约束条件并应用边界切线方向传播之后的边界松弛的示例。网格边界1105上的松弛实现几乎在整个有机边界上的正则约束条件而不会造成映射变形, 从而产生非常正则的可易于编辑的有机曲面边界1110。这些修改产生沿着控制网格边界的简单的尽可能正则的四边形结构, 从而在构造 \mathbb{O} 与 $\{S_i\}$ 之间的接触曲线时实现改进的结果。

[0099] 4.2-大小字段

[0100] 生成式形状通常由大小各异的特征构成。为了避免大型特征上的浪费控制网格复杂性并提高可编辑性,可应用方法来计算各向异性自适应大小字段,所述字段指定控制网格边长度大小以覆盖足够较小的特征并避免较大特征的过度表示。可沿着交叉场方向指定各向异性大小字段。期望边长度 $(d_{i,u}, d_{i,v}) \forall T_i \in \mathbb{O}$ 可根据Alliez, P., Cohen-Steiner, D., Devillers, O., Levy, B. 和Desbrun, M. 的Anisotropic polygonal remeshing, Proc. of ACM SIGGRAPH 03, 485-493, 2003中的方程式(6)来设定:

$$[0101] \quad d_{i,t}(\kappa_{i,t}) = \sqrt{\epsilon_t \left(\frac{2}{|\kappa_{i,t}|} - \epsilon_t \right)}, \quad t = \{u, v\},$$

[0102] 其中 $(\kappa_{i,u}, \kappa_{i,v})$ 是 T_i 上沿着交叉场方向的估计曲率,并且通过确保 $\epsilon_t < 2/r \max_i \kappa_{i,t}$ 自动地选择 (ϵ_w, ϵ_v) 来保持最小形状特征。

[0103] 4.3-参数化

[0104] 应用Bommes, D., Campen, M., Ebke, H.-C., Alliez, P. 和Kobbelt, L. 的Integer-grid maps for reliable quad meshing, ACM Transactions on Graphics 32, 4, 1, 2013中被修改来使用Campen, M., Bommes, D. 和Kobbelt, L. 的Quantized global parametrization, ACM Transactions on Graphics 34, 6, 1-12, 2015中的量化算法的单射全局参数化方法,获得符合先前计算的交叉场和大小字段的量化全局连续映射 $\phi: \mathbb{O} \rightarrow \Omega$ 。此映射图的性质允许直接定义在四边形图集 $\{Q_i | \cup Q_i = \Omega, Q_i \cap Q_j = \emptyset\}$ 上参数化的T样条曲面 \mathbb{O} 。

[0105] 计算逆映射 $\phi^{-1}: \Omega \rightarrow \mathbb{O}$ 并使其松弛以改进奇点位置并减少失真; ϕ^{-1} 用于构建通过 Ω 将有机曲面映射到有机网格的双射对应 $\eta: \mathbb{O} \rightarrow \mathbb{O} = \phi^{-1}(\mathbb{O}^{-1})$ 。

[0106] 4.4-逼近

[0107] 通过提供 η ,可将通用T样条逼近方法应用于计算曲面拟合 \mathbb{O} 。根据应用要求,用于如何指定逼近问题的不同策略根据特定条件而可用。(1) 如果更简单更容易地编辑有机曲面是优选的,则可通过在不受最大偏差的限制的情况下求解线性 $\min L^2(\mathbb{O}, \mathbb{O})$ 问题来计算控制网格顶点位置。在一些实现方式中, \mathbb{O} 也表示为Catmull-Clark曲面。(2) 如果寻求到 \mathbb{O} 的紧密拟合,则求解出公差 $\delta > 0$ 的非线性界限问题 $L^\infty(\mathbb{O}, \mathbb{O}) < \delta$ 。在这种情况下,逼近算法可将 $L^2(\mathbb{O}, \mathbb{O})$ 逼近与T形接头细化进行交织,其中 $\{Q_i | \max_{p \in Q_i} |\mathbb{O}(p) - \mathbb{O}(p)| > \delta\}$ 。在一些实现方式中,输出是自适应细化T-NURCC曲面(例如,使用类似于Li, W.-C., Ray, N. 和Levy, B. 的Automatic and Interactive Mesh to T-Spline Conversion, Proc. of the Symposium on Geometry Processing, 191-200, 2006中方法的方法)。由于 \mathbb{O} 在生成式求解器准确度极限内逼近平滑曲面,因此相应地设定 δ (例如, $\delta = \sqrt{3} \times$ 基于水平集的求解器的体素栅格边长度)。(3) 可要求 \mathbb{B} 的受限紧密拟合,以确保与输入实体的接合点附近的曲面准确度。在这种情况下,针对边界控制点求解 $L^\infty(\mathbb{B}, \partial \mathbb{O}) < \delta$,并且通过求解 $\min L^2(\mathbb{O}, \mathbb{O})$ 完成内部中的拟合。

在一些实现方式中,计算自适应细化T-NURCC曲面,其中T-NURCC曲面紧密地逼近有机边界(求解 $L^\infty(\mathbb{B}, \partial O) < \delta$),而较松散地逼近内部(求解 $\min L^2(\mathbb{O}, O)$),以作为曲面复杂性与准确度之间的折衷。关于此类逼近方法的更多细节,请参见2019年4月18日提交并且名称为“CONVERSION OF MESH GEOMETRY TO WATERTIGHTBOUNDARY REPRESENTATION”的美国专利申请号16/388,771,所述申请以引用方式并入本文。

[0108] 5-边界接触

[0109] 为了使构成的输出B-Rep具有水密性,有机曲面边界 $\partial O = \cup \partial O_i$ 应包含在体积 $\mathbb{S} = \cup S_i$ 中,即 $\partial O \subset \mathbb{S}$ 。因此,对有机曲面边界 $\{O_{i,j}\}$ 施加拉动修改以构造对应的B-Rep接触曲线 $\{C_{i,j} = \partial O_i \cap S_j\}$ 。这确保了后续水密B-Rep构成的成功结果。这对于所有有机曲面边界曲线 $\{\partial O_{i,j}\}$ 是相同的,因此省略了索引对*i, j*。

[0110] 图12示出产生与对应的边界曲线同胚的接触曲线的拉动修改之前和之后的有机边界曲面1200的示例。具有较低采样准确度的生成式设计在边界有机曲面1200与接触输入实体1210之间产生较大可见间隙1205。对有机曲面1200应用拉动算法以去除间隙,如1215处所示。相交曲线与对应的有机边界曲线是同胚的,这允许构造水密输出B-Rep1220。

[0111] 5.1-边界对应

[0112] 遵循第4.3节构造的双射对应 η 的边界限制 $\partial \eta: \partial O \rightarrow \mathbb{B}$,确定与 \mathbb{B} 并且相应地与 ∂O 关联的实体S。在一些实现方式中,根据上文第2.2节中计算的网格分区确定与 \mathbb{B} 关联的实体S。如果多个不同类型的相邻实体与同一边界曲线关联,则S是这多个相邻实体的并集。通过构造,此类实体具有重叠边界,并因此它们的并集定义有效的路径连接的实体。从IGM可找到对应的有机曲面边界, $\phi: \mathbb{B} \rightarrow \partial O$ 。

[0113] 5.2-边界拉动

[0114] 令 $D_j(\cdot)$ 为 ∂S 的带符号距离,对于 $p \in S$, $D(p) \leq 0$; ∂O 被“拉动”成使得 $D(\partial O) = \max_{p \in \partial O} D(p) \leq \xi$,其中 $\xi < 0$ 是适于确保交集 $C = O \cap \partial S$ 和 ∂O 为同胚的负安全公差(参见下文第5.3节)。使 $D(\partial O) \leq \xi < 0$ 暗示 $\partial O \subset S^0$,因此S与O之间的接触是水密的。

[0115] 使用 ∂O 的NURBS参数化 $c(t) = \sum_i c_i B_i(t)$,其中 $\{B_i\}$ 是沿着 ∂O 的NURBS基函数,并且 $\{c_i\}$ 是对应的曲面边界控制点,相对于 $\{c_i\}$ 评估 $D(\partial O) = \max_{p \in \partial O} D(p) = \max_t D(c(t))$ 寿 $\nabla D(\partial O)$:

$$[0116] \quad \nabla D(\partial O) = \left(\dots, \frac{\partial \max_t D(c(t))}{\partial c_i}, \dots \right)$$

[0117] 接下来,应用梯度下降方法以使 $\{c_i\}$ 沿着 $-\nabla D(\partial O)$ 移动,直到 $D(\partial O) \leq \xi$ 。

[0118] 为了高效地实现 $D(c(t))$ 的评估,使用了围绕 \mathbb{S} 的分层空间参数化。线搜索 $\min_t D(c(t))$ 可通过在 $c(t)$ 的域上维持致密均匀样品栅格 $\{t_j\}$ 来加速,从而将基函数值 $\{B_i(t_j)\}$ 进行高速缓存。最后,在 c_i 的投影点 $q_i \in \partial S$ 处用单位法线 \vec{n}_i 松散地逼近偏导数 $\partial D(\partial O) / \partial c_i$ 效果很好,并且显著地减少了计算时间。如果 q_i 恰好位于尖锐边或拐角顶点上,则将 n_i 定义为与 q_i 关联的曲面法线的平均值。

[0119] 拉动过程通常在几次迭代中迅速收敛。有时,遇到算法未能在特定迭代次数(例如,100)内将边界的小分段拉动到S内的情况。在此类情况下,可通过凭借局部插入(Sederberg,T.W.、Cardon,D.L.、Finnigan,G.T.、North,N.S.、Zheng,J.和Lyche,T.的T-spline simplification and local refinement,Proc.of ACM SIGGRAPH 04,276-283,2004)新边界顶点将分段平分并且重新运行拉动算法来校正分段。边界拉动和细化可在收敛之前进行迭代;在此问题的大多数情况下,仅需要几个新顶点和细化步骤。

[0120] 5.3-安全公差

[0121] 实际上,由于下层几何结构表示的准确度限制,如果曲面中的一个曲面的边界与另一个曲面几乎重合,则曲面-曲面求交实现方式可能无法计算正确交集结果。因此,如果 ∂O 与 ∂S 几乎重合,则计算出的交集 $C = O \cap \partial S$ 可不与 ∂O 同胚。

[0122] 为了处理此类情形,可将拉动修改最初设置为 $\xi = -1 \times$ (由求交算法使用的下层准确度公差计算 $C = O \cap \partial S$)。一旦完成拉动,就计算 $C = O \cap \partial S$ 并且检查其是否与 ∂O 同胚。如果不是这种情况,则可将安全公差提高标量值(例如, $\xi \rightarrow 2\xi$),然后可恢复拉动。迭代地应用此策略允许鲁棒地处理准确度限制。作为性能优化,如果已知下层曲面准确度受限,则可优选地以较大初始公差初始化 $|\xi|$ 。

[0123] 5.4-公差建模

[0124] 一些B-Rep建模内核(例如,Siemens Parasolid)支持“公差”边和顶点,这些边和顶点表示非相交或部分相交的曲面的接触曲线和点(Jackson,D.J.的Boundary representation modelling with local tolerances,Proceedings of the third ACM symposium on Solid modeling and applications-SMA'95,ACM Press,247-254,1995)。如果公差建模能力可用,则可指定表示限制接触曲面间隙的最大支持公差的距离 $\mu > 0$ 。然后,设定 $\xi = \mu > 0$ 以在距 S_μ 以内拉动 ∂O 。因此,无需计算 $C = O \cap \partial S$,因为规定了 $C = \partial O = O \cap S_\mu$,其中 $S_\mu = \{p | D(p) \leq \mu\}$ 。

[0125] 5.5-有机形状变化

[0126] 第2.1节中的关联构造暗示 \mathbb{B} 包含在距S距离 $d > 0$ 以内,其中 $d \approx$ 生成式求解器准确度。因此,如果应用了第4.4节中的拟合策略 $L^\infty(O, O) < d$ 或 $L^\infty(\mathbb{B}, \partial O) < d$,则最初, $D(\partial O) \leq 2d$ 。因此,由“拉动” $\sim 2d$ 引入的形状变化在设计准确度公差之内,并且不影响生成式结果的有效性。

[0127] 如果替代地求解出第4.4节中的更简单的问题 $\min L^2(O, O)$,则初始 $D(\partial O)$ 不受限。然而,实际上, ∂O 足够接近S,使得引入的变化是可接受的。B-Rep建模计算比生成式表示采样公差准确许多数量级。因此, $|\xi| \ll d$,并且由附加安全公差拉动引起的形状变化 $D(\partial O) \leq \xi < 0$ 可忽略不计。

[0128] 6-构成

[0129] 接下来,通过组合有机曲面 $\{O_i\}$ 和输入实体 $\{S_i\}$ 来构成表示生成式设计的水密B-Rep。现在构造了所有边界的接触曲线 $\{\partial O_i\}$,因此仅需确定必须为输出生成式B-Rep分配多少体积。

[0130] 目前为止,允许型输入实体和禁止型输入实体尚未消除歧义。定义子集 $\mathbf{S} = \mathbf{K} \cup \mathbf{L} \cup \mathbf{P}$, 其中 \mathbf{K} 、 \mathbf{L} 和 \mathbf{P} 分别是允许型、禁止型和种子型输入实体。

[0131] 6.1-曲面布尔运算

[0132] \mathbf{S} 和 $\{O_i\}$ 可使用在实体和定向薄片上起作用的现有公认的布尔运算来组合 (Granados, M.、Hachenberger, P.、Hert, S.、Kettner, L.、Mehlhorn, K. 和 Seel, M. 的 Boolean Operations on 3D Selective NefComplexes Data Structure, Algorithms, and Implementation, Algorithms-ESA 2003:11th Annual European Symposium, Springer, 174-186, 2003; Hachenberger, P. 和 Kettner, L. 的 3D Boolean Operations on NefPolyhedra, CGAL User and Reference Manual, CGAL Editorial Board, 2018)。组合 \mathbf{S} 和 $\{O_i\}$ 的一种方式包括以下步骤: (1) 将曲面 $\{O_i\}$ 组合成单个 (不相交) 定向薄片 $\mathbf{P} = \cup O_i$; 并且 (2) 执行布尔合并 $\mathbf{G} = \mathbf{S} \cup \mathbf{P}$ 。因为通过构造 $\partial \mathbf{P} \subset \mathbf{S}$, 运算形成有效实体 \mathbf{G} ; (3) 减去禁止型实体, 以产生期望输出 B-rep $\mathbf{G} \setminus \mathbf{L}$ 。

[0133] 6.2-元胞构成

[0134] 替代地, 可使用本领域中已确立的细胞建模技术 (Arnon, D. 的 Acellular decomposition algorithm for semialgebraic sets, Springer, Berlin, Heidelberg, 301-315, 19)。这具有以下优点: 对用户和开发人员两者而言, 定向薄片和部分实体上的布尔运算始终被证明是令人困惑且违反直觉的; 并且元胞方法产生了生成式设计的中间元胞分解, 这可用于定制结果或诊断由于不良输入而导致的故障。

[0135] 6.2.1-元胞创建

[0136] 构造了“总体”无空隙实体 \mathbf{U} (例如, 作为扩展的限制框或球体), 所述实体严格包含所有输入实体和有机曲面 $\mathbf{S} \cup \{O_i\} \subset \mathbf{U}$ 。 \mathbf{U} 被分区成由有机曲面 $\{O_i\}$ 、实体曲面 $\{\partial S_i\}$ 和总体曲面 $\partial \mathbf{U}$ 限制的路径连接的实体元胞 $\{U_i \mid \mathbf{U} U_i = \mathbf{U}, U_i^\circ \cap U_j^\circ = \emptyset\}$, 即, $\{\partial U_i\} = \{O_i\} \cup \{\partial S_i\} \cup \partial \mathbf{U}$ 。通过构造, 存在包含总体边界 $\partial \mathbf{U} \subset \partial U_0$ 的单个元胞 U_0 : 丢弃 U_0 , 并且剩余元胞将满足 $\{\partial U_i\} = \{O_i\} \cup \{\partial S_i\}$ 。

[0137] 6.2.2-元胞分类

[0138] 图13示出用于构成水密B-Rep的过程的示例。输入实体1300和网格分区1305用于控制将有机T样条曲面1310 (或其他曲面类型, 例如, T-NURCC曲面) 与输入实体1300组合以形成水密B-Rep 1315。每个 U_i 被确定为最终生成式B-Rep的内部或外部。如果对于一些 $S_j \subseteq \mathbf{K}$, $U_i \subseteq S_j$, 则 U_i 被分类为内部, 否则为外部。对于所有其他元胞, 检查元胞边界 ∂U_i 。

[0139] 令 $\{F_{ij}\}$ 是 ∂U_i 的曲面面分区, 即 $\{F_{ij} \mid \mathbf{U} F_{ij} = \partial U_i, F_{ij}^\circ \cap F_{ik}^\circ = \emptyset\}$, 其中每个面 F_{ij} 与单个曲面 O_k 或 ∂S_k 的路径连接的子集重合: (1) 如果 $\forall F_{ij}, F_{ij} \subset \{\partial S_k\}$, 则 U_i 在其是 \mathbf{S} 的空集的情况下被分类为外部, 否则为内部, 因为接着 $U_i \subseteq S_j \in \mathbf{P}$; (2) 如果 $\exists F_{ij}, F_{ij} \subseteq O_k \in \{O_k\}$, 并且 O_k 具有与 F_{ij} 相同的方向, 则将元胞临时分类为内部; (3) 如果 $\exists F_{ij}, F_{ij} \subseteq O_k \in \{O_k\}$, 并且 O_k 具有与 F_{ij} 相反的方向, 则元胞将暂时分类为外部; (4) 如果 (2) 和 (3) 都为真, 则将元胞分类为内部,

并报告指示无效算法输入的诊断。(5) 否则,采用临时分类。它们中,通过合并所有内部元胞 $\{U_i\}$ 构成输出生成式实体B-Rep。

[0140] 图14是包括可被编程为客户端或服务器的数据处理设备1400(也称为计算机1400)的数据处理系统的示意图。数据处理设备1400通过网络1480与一个或多个计算机1490连接。虽然在图14中示出仅一个计算机作为数据处理设备1400,但可使用两个或更多个计算机。数据处理设备1400包括可分布在应用层与操作系统之间的各种软件模块。这些模块可包括可执行和/或可解释软件程序或库,包括实现本申请中所述的系统和技术的一个或多个CAD程序1404的工具和服务。因此,一个或多个CAD程序1404将生成式设计网格转换成可编辑且水密的B-Rep模型,如本文所述。此外,一个或多个CAD程序1404可提供另外的功能和特征,包括实现生成式设计过程(例如,采用一个或多个水平集方法来自动地创建3D模型设计的生成式设计求解器)和/或计算机辅助工程(CAE)、计算机辅助制造(CAM)和计算机数字控制(CNC)程序的功能以用于增材制造和/或减材制造。所使用的软件模块的数量可随实现方式的不同而不同。此外,软件模块可分布在通过一个或多个计算机网络或其他合适的通信网络连接的一个或多个数据处理设备上。

[0141] 数据处理设备1400还包括硬件或固件装置,包括一个或多个处理器1412、一个或多个另外的装置1414、非暂时性计算机可读介质1416、通信接口1418以及一个或多个用户接口装置1420。每个处理器1412能够处理用于在数据处理设备1400内执行的指令。在一些实现方式中,处理器1412是单线程或多线程处理器。每个处理器1412能够处理存储在计算机可读介质1416或永久性存储装置(诸如,另外的装置1414中的一者)上的指令。数据处理设备1400使用通信接口1418来例如通过网络1480与一个或多个计算机1490通信。用户接口装置1420的示例包括显示器、相机、扬声器、传声器、触觉反馈装置、键盘、鼠标和虚拟现实(VR)和/或增强现实(AR)设备。数据处理设备1400可将实现与本文所述的一个或多个程序相关联的操作的指令存储在例如计算机可读介质1416或一个或多个另外的装置1414上,所述计算机可读介质1416或一个或多个另外的装置1414还包含非暂时性计算机可读介质,诸如非暂时性计算机可读介质1416,例如,硬盘装置、光盘装置、磁带装置和固态存储器装置中的一者或多者。

[0142] 图14的系统可用于设计和潜在地制造物理结构,其中一个或多个CAD程序1404实现三维(3D)建模功能并将网格几何结构转换为要制造的零件的水密边界表示。网格几何结构可从不同源获得,但通常,网格几何结构将与呈边界表示格式的一个或多个建模实体相关联。在一些实现方式中,系统包括扫描物理对象以生成物理对象的网格表示的3D扫描仪(未示出),并且一个或多个CAD程序1404可使用此输入网格以通过将正则的几何形状拟合到网格来生成一个或多个建模实体(例如,B-Rep),并且一个或多个CAD程序1404可使用本文所述的系统和技术来将网格的剩余部分(过于复杂以致无法使用正则的几何形状建模的那些部分)转换为边界表示格式(例如B-Rep),并且将它们与一个或多个建模实体连接。在此示例中,一个或多个CAD程序1404包括扫描和建模功能。

[0143] 在一些实现方式中,一个或多个CAD程序1404实现一个或多个生成式设计过程,所述生成式设计过程采用用于生成式设计的材料或微结构技术和/或几何或宏观结构技术(例如,用于拓扑优化的实体各向同性材料惩罚(SIMP)和/或水平集方法)。一个或多个建模实体可使用传统3D建模技术产生于(或加载到)一个或多个CAD程序中,并且这些建模实体

(也称为一个或多个输入实体)可用作生成式设计过程的优化域的一个或多个子空间。因此,生成式设计过程可输出表示将与用作输入的一个或多个建模实体连接的自动生成的几何结构的网格。此外,在各种实现方式中,一个或多个CAD程序1404可实现物理模拟(有限元分析(FEA)或其他)以及还有制造控制功能。

[0144] 如本文所用,CAD是指用于设计满足指定设计要求的物理结构的任何合适的程序,无论程序是否能够与特定制造设备交互和/或控制所述特定制造设备。因此,一个或多个CAD程序1404可包括一个或多个CAE程序、一个或多个CAM程序等。一个或多个程序1404可在计算机1400上本地运行,在一个或多个远程计算机系统1490(例如,一个或多个第三方提供商的可由计算机1400通过网络1480访问的一个或多个服务器系统)的计算机上远程运行,或者本地和远程运行。因此,CAD程序1404可以是在两个或更多个单独的计算机处理器上协同操作的两个或更多个程序,因为在计算机1400处本地操作的程序1404可通过使一个或多个计算机1490上的一个或多个程序1404执行卸载的处理操作将处理操作(例如,网格转换、生成式设计和/或物理模拟操作)卸载“到云端”。

[0145] 一个或多个CAD程序1404可在计算机1400的显示装置1420上呈现用户接口(UI),所述用户接口可使用计算机1400的一个或多个输入装置1420(例如,键盘和鼠标)来操作。输入和输出装置1420的各种子集可彼此和/或与计算机1400分离或集成,诸如在平板电脑中(例如,触摸屏可以是输入/输出装置1420)。此外,计算机1400可包括VR或AR系统或者是VR或AR系统的一部分。例如,输入/输出装置1420可包括VR/AR输入手套和/或VR/AR耳机。

[0146] 如上所指出,一个或多个CAD程序1404实现3D建模功能,这意指3D模型可使用一个或多个CAD程序1404构建。一个或多个CAD程序1404可实现物理模拟(在本地和/或通过远程过程调用)来辅助构建3D模型。物理模拟(诸如FEA、计算流体动力学(CFD)、声学/噪声控制、热传导和/或计算注塑成型模拟)通常是基于CAD的产品开发中不可或缺的部件。一个或多个CAD程序1404可用于构建设计模型的精确几何描述,而物理模拟实现改进的性能而无需耗时的物理测试。

[0147] 一个或多个CAD程序1404可提供使用户能够指定用于一个或多个物理模拟的输入的用户接口元件,诸如用于一个或多个3D模型的材料和加载工况,其中加载工况定义由被设计的零件在零件的使用期间承担的不同方向上的载荷。因此,用户可与一个或多个CAD程序1404的UI交互,包括为要制造的零件产生完整机械问题定义,以便构建和修改可存储在一个或多个3D模型文档中的一个或多个3D模型。如将了解,可使用本文所述的系统和技术来设计许多可能的3D模型。

[0148] 此外,一个或多个CAD程序1404可实现至少一个生成式设计方法(在本地和/或通过远程过程调用),所述方法使一个或多个CAD程序1404能够基于设计标准自动地生成一个或多个3D模型的一个或多个部分(或整个3D模型),其中几何设计是基于模拟反馈迭代地优化的。注意,如本文所用,“优化”(或“最优”)并不意指在所有情况下都实现了所有可能设计中的最佳设计,而是鉴于可用处理资源,从可在规定时间内生成的可能设计的有限集合中选择最佳(或接近最佳的)设计。设计标准可由用户或另一方定义,并且导入一个或多个CAD程序1404中。例如,可通过例如通过显示装置1420上的UI接收用户输入来为一个或多个CAD模型1404建模的对象获得设计空间、载荷工况和设计标准。

[0149] 3D模型包括用作生成式设计过程的输入(例如,作为保留体输入的B-Rep)的一个

或多个建模实体,所述一个或多个建模实体根据输入几何结构设定的边界条件从中生成网格。各种生成式设计过程可用于优化3D模型的网格部分的形状和拓扑。可将一个或多个输入实体转换为网格几何结构以用作生成式设计过程的输入,来自生成式设计过程的网格输出可包括对应于一个或多个输入实体的网格部分,并且可去除这些部分以产生所生成模型的有机网格部分。然后将此网格部分转换成可编辑边界表示格式(例如,B-Rep、T样条、细分曲面和/或其他计算机3D建模格式)并连接到一个或多个建模实体以形成生成设计对象的水密模型。

[0150] 此外,在一些实现方式中,一个或多个CAD程序1404实现制造控制功能。一旦用户对3D模型感到满意,就可将3D模型存储为一个或多个3D模型文档和/或用于生成模型的另一个表示(例如,用于增材制造的.STL文件)。这可在用户请求时或根据用户对另一个动作(诸如将3D模型发送到一个或多个增材制造(AM)机器1495或可直接连接到计算机1400或通过网络1480连接的其他制造机械,如图所示)的请求来完成。这可能涉及在本地计算机1400或云服务上执行以将3D模型导出到要根据其制造的电子文档的后处理。注意,电子文档(为简便起见将简称为文档)可以是文件,但不一定对应于文件。文档可存储在保存其他文档的文件的一部分中、存储在专用于所讨论文档的单个文件中或存储在多个协调文件中。

[0151] 在任何情况下,一个或多个CAD程序1404可向AM机器1495提供文档(具有适当格式的工具路径说明),以产生对应于生成式设计的3D模型的物理结构。AM机器1495可采用一种或多种增材制造技术,诸如颗粒技术(例如,粉末床熔融(PBF)、选择性激光烧结(SLS)和直接金属激光烧结(DMLS))、挤压技术(例如,可包括金属沉积AM的熔融沉积建模(FDM))。在一些情况下,AM机器1495直接构建物理结构,并且在一些情况下,AM机器1495构建用于在铸造或锻造物理结构中使用的模具。此外,用户可保存或传输3D模型以供以后使用。例如,一个或多个CAD程序1404可存储包括3D模型的一个或多个文档。

[0152] 在一些实现方式中,一个或多个CAD程序1404实现要在制造过程中使用的一个或多个减材制造(SM)机器1495(例如,计算机数字控制(CNC)铣床,诸如多轴多工具铣床)的制造控制功能。例如,一个或多个CAD程序1404可生成用于机床系统1495的CNC指令,所述机床系统1495包括可用于各种机加工操作的多个工具(例如,不同大小和形状的实体碳化物圆角工具,以及接收金属插入件以创建不同切割曲面的不同大小的插入工具)。因此,在一些实现方式中,一个或多个CAD程序1404可向SM机器1495提供对应的文档(具有适当格式的工具路径说明,例如,CNC数字控制(NC)程序)以用于在使用各种切割工具制造物理结构中使用等。

[0153] 在一些实现方式中,一个或多个CAD程序1404提供指令以在第一制造阶段中例如使用直接AM和/或使用锻造和/或铸造方法来构建工件,并且一个或多个CAD程序1404还提供指令以在第二制造阶段例如在3轴CNC铣削系统对工件进行机加工(例如,粗加工和/或精加工操作),以便形成完成结构。一般来说,可单独地或组合地采用各种不同的制造系统和技术来产生最终结构,并且一个或多个CAD程序1404可包括合适的算法以针对这些各种系统中的一个或多个系统生成工具路径说明,以制造已使用本申请中所述的系统和技术设计的零件。

[0154] 图15示出用于将网格几何结构转换为要制造的对象的水密边界表示的过程的示例。例如通过一个或多个CAD程序1404获得1505要制造的对象的第一3D模型。第一3D模型包

括与一个或多个建模实体相关联的多边形网格,例如,通过采用一个或多个输入实体(呈边界表示格式)作为生成式设计过程的优化域的一个或多个子空间的生成式设计过程产生的多边形网格。生成式设计过程可采用体积网格方法来创建对象的生成式设计。生成式设计过程可采用水平集方法来创建对象的生成式设计。此外,获得1505可包括:调用生成式设计过程以产生生成式设计或从另一个过程或源接收生成式设计。

[0155] 多边形网格可以是原始的或转换而成的三角形网格,但可使用各种类型的网格格式,包括四面体或六面体网格。此外,虽然本公开的重点在于生成式设计,其中多边形网格与生成式设计的边界重合,但其他实现方式也是可能的。例如,呈边界表示格式(例如,B-Rep)的一个或多个建模实体可以是已拟合到扫描网格的正则几何形状,而不是用作生成式设计过程的输入的一个或多个建模实体。

[0156] 此外,过程可任选地包括检查1510(在存在用于生成式设计过程的两个或更多个输入实体的情况下)以用于检测(两个或更多个输入实体中的至少两者之间)小于生成式设计过程的准确度的一个或多个间隙。生成式设计约束条件设置有时包含非常小的间隙,这些间隙无意间留在通常不同类型的相邻输入实体(例如,允许型与禁止型实体)之间。实际上,求解器忽略这些间隙,并且在其表示中“合并”实体。这在减小体素网格大小以捕获微小间隙通常不切实际的水平集表示中尤为明显。如果 δO 与此类间隙相交,则拉动算法(参见例如上文第5.2节)无法收敛,因为无法将间隙内 δO 的小部分拉入 S^0 。为了解决这个问题,可在生成式设置中检测1510这些小间隙,并且可扩展1515输入B-Rep实体以填充间隙。这种检查和扩展被示出为发生在获得1505第一3D模型之前,但在一些实现方式中,这种检查和扩展也可在获得1505第一3D模型之后执行。

[0157] 例如通过一个或多个CAD程序1404将多边形网格分区1520成与一个或多个输入实体关联的第一部分和与一个或多个输入实体关联的第二部分。用于这种分区的方法都是可行的,诸如上文第2节所述。一般来说,网格中的特定多边形不必完全由输入实体包含以被视为与一个或多个输入实体关联,即视为网格的非有机部分,并且网格中的特定多边形不必完全在所有输入实体的外部以被视为与一个或多个输入实体无关联,即被视为网格的有机部分。

[0158] 在一些实现方式中,分区1520涉及:基于根据与生成式设计过程的准确度相关联的生成式设计信息确定的关联数据,将网格的三角形分配到第一(关联)部分。例如,生成式设计信息可包括距离信息,并且分配1520可包括基于三角形的顶点与一个或多个输入实体之间的阈值距离,将三角形分配到第一(关联)部分,其中当顶点由输入实体包含或者包含在输入实体的曲面的阈值距离之内时,三角形的顶点被视为与输入实体关联。阈值距离对应于通过生成式设计过程创建的生成式设计的表示的离散化准确度,例如,阈值可基于水平集栅格元胞大小或体积网格元素离散化与输入B-Rep之间的最大距离来设置。因此,在分区1520中考虑了生成式设计输出的固有模糊性。上文在第2.1节、第2.2节和第2.3节中提供了分区1520的另外的详细示例。

[0159] 此外,图16示出通过CAD实体模型的拓扑优化而生成的分区网格几何结构的过程的示例,其中消除了非流形边界顶点。过程开始检查网格的三角形,以将其分配到网格的第一(非有机)部分或网格的第二(有机)部分。网格的第一部分在以下意义上是“非有机的”:其对应于一个或多个平滑且精确数学曲面,所述曲面可以是作为生成式设计过程的输入提

供的一个或多个建模实体,或者是拟合到扫描仪的网格输出的正则几何形状。网格的第二部分在以下意义上是“有机的”。其表示通过生成式设计过程或扫描仪产生的复杂形状,所述扫描仪生成的形状不容易使用拟合到网格的正则几何形状进行建模。

[0160] 虽然网格三角形有待被分配1600,但对每个三角形进行检查1605,以确定三角形是否具有不与一个或多个建模实体中的任一者关联的至少一个顶点。当三角形具有被确定为不与输入实体(或所生成实体)关联的至少一个顶点时,将三角形分配1610给第二(有机)部分。否则,将三角形分配1615给网格的第一(非有机)部分。因此,即使当三角形的三个顶点中的两个顶点由输入实体包含时,也可将三角形分配到网格的有机部分。此外,如本申请的其他地方(例如,上文第2.1节)所解释的,三角形的顶点仅需要在建模实体的阈值距离内即可被视为与建模实体关联。因此,没有顶点由输入实体包含的三角形可在这些顶点中的全部三个顶点在由(生成式设计过程或扫描仪的)离散化准确度设定的阈值距离内的情况下被分配到网格的非有机(关联)部分。

[0161] 一旦网格的三角形已被分配到网格的第一(关联/非有机)部分或第二(有机/非关联)部分,就可采用另外的检查与重新分配过程作为分区过程的一部分。可针对非2流形(即,顶点连接多于两个边界边)的任何边界顶点(即,连接分开网格的两个部分的边界边的顶点)进行检查1620。因此,针对任何非流形边界顶点的检查1620涉及找到(i)位于第一部分与第二部分之间的边界上并且(ii)连接多于两个位于第一部分与第二部分之间的边界上的边界边的顶点。有关更多细节,在上文中并结合图7参见第3.1节。

[0162] 对于找到的每个此类非流形边界顶点,将包括非流形边界顶点的一个或多个关联三角形从网格的第一(关联/非有机)部分重新分配到第二(有机/非关联)部分。注意,此类重新分配改变网格的两个部分之间的边界,从而导致边界边以及因此的边界顶点的变化。因此,单次通过可能是不够的,并且过程可包括迭代地重复检查1620和重新分配1625,直到无非流形边界顶点剩余为止。这可涉及检查1630,以确定是否在最后一次迭代中贯穿边界顶点进行了任何重新分配。一旦不再需要进行任何另外的三角形重新分配,过程结束。

[0163] 返回图15,一旦完成分区1520,就可例如通过一个或多个CAD程序1404针对多边形网格的第二部分构造1525一个或多个可编辑平滑曲面。一个或多个可编辑平滑曲面中的每一者都具有全局平滑参数化,所述全局平滑参数化允许全局平滑自由形式曲面编辑。如上所指出,可使用各种类型的曲面定义格式,包括T-NURCC、T样条、LRB样条和/或分层B样条。可使用各种方法来构造1525一个或多个可编辑平滑曲面,包括上文在第4节中所述的一个或多个方法、下文结合图17所述的一个或多个方法和/或在2019年4月18日提交的美国专利申请号16/388,771中所述的一个或多个方法。

[0164] 例如通过一个或多个CAD程序1404来修改1530一个或多个可编辑平滑曲面的一个或多个边界,以在与一个或多个经修改的平滑曲面与一个或多个输入实体(或者对应于拟合到所扫描网格的正则几何形状的一个或多个其他建模实体)之间的未修改边界同胚的一个或多个接触曲线处接触一个或多个输入实体(或者对应于拟合到所扫描网格的正则几何形状的一个或多个其他建模实体)。这确保了由网格的有机部分构造的平滑曲面将完全接触一个或多个输入实体(或对应于拟合到所扫描网格的一个或多个正则几何形状的一个或多个其他建模实体)。因此,最终3D模型将是水密的。一个或多个可编辑平滑曲面的修改1530可包括上文第5节所述的一个或多个方法和/或下文结合图17所述的一个或多个方法。

[0165] 然后,例如通过一个或多个CAD程序1404将一个或多个经修改的平滑曲面与一个或多个输入实体(或对应于拟合到所扫描网格的一个或多个正则几何形状的一个或多个其他建模实体)组合1535,以形成要制造的对象的第二3D模型。第二3D模型包括在一个或多个无间隙接触曲线处与呈边界表示格式的一个或多个输入实体(或一个或多个其他建模实体)的一个或多个部分接触的一个或多个经修改的平滑曲面。第二3D模型是水密的,并且一个或多个无间隙接触曲线中的每一者和一个或多个经修改的平滑曲面中的每一者可使用自由形式建模操作来编辑。合并1535可包括使用对实体和定向薄片起作用的布尔运算或使用元胞建模技术。合并1535可包括上文第6节所述的一个或多个方法和/或下文结合图17所述的一个或多个方法。

[0166] 此外,在一些实现方式中,可对第二3D模型执行另外的处理。例如,可进行检查1540以标识在经修改的平滑曲面与输入实体之间不提供至少切线(G^1)连续性的一个或多个无间隙接触曲线中的任一者。当标识此类接触曲线时,可在一个或多个无间隙接触曲线中的至少一者处应用1545融合操作,以在经修改的平滑曲面与输入实体之间提供至少切线(G^1)连续性。因此,可替换有机区域与关联区域之间的一个或多个相交曲线,以改进第二3D模型中一个或多个无间隙接触曲线处的形状特性。还可执行其他连续性检查和另外的后处理操作,例如以使一个或多个接合点具有切线(G^1)连续性或曲线(G^2)连续性。

[0167] 此外,在一些实现方式中,第二3D模型可例如通过一个或多个CAD程序1404来提供1550,以用于在使用一个或多个计算机控制的制造系统(例如,AM机器1495、SM机器1495和/或其他制造机器)来制造对应于对象的物理结构中使用。提供1550可涉及:将水密3D模型保存到永久性存储装置,以用于在使用一个或多个计算机控制的制造系统(例如,AM机器1495和/或SM机器1495)来制造对应于对象的物理结构中使用。在一些实现方式中,提供1550涉及:例如通过一个或多个CAD程序1404使用第二3D模型来针对一个或多个计算机控制的制造系统(例如,AM机器1495和/或SM机器1495)生成1552工具路径说明,以及例如通过一个或多个CAD程序1404利用一个或多个计算机控制的制造系统(例如,AM机器1495和/或SM机器1495)使用针对增材制造机器(例如,AM机器1495和/或SM机器1495)生成的工具路径说明来制造1554对应于对象的物理结构的至少一部分。

[0168] 图17示出分区1520网格几何结构、针对网格几何结构的有机部分构造1525一个或多个可编辑平滑曲面以及修改1530一个或多个可编辑平滑曲面的一个或多个边界的过程的示例。例如通过一个或多个CAD程序1404将网格几何结构的多边形分配1705到网格的第一(关联/非有机)部分或第二(有机/非关联)部分。然后,在有机边界处执行一个或多个另外的处理操作,以作为分区过程的一部分,诸如上文在第3节中并且结合图16所述。这种另外的处理可包括:例如通过一个或多个CAD程序1404通过以下方式来松弛1710由位于第一部分与第二部分之间的边界上的边界边形成的边界形状:至少部分地使边界顶点位置朝向其平均值移位以减小边界形状的角度和长度偏差。上文在第3.3节中提供了松弛1710的其他细节。

[0169] 为了构造,例如通过一个或多个CAD程序1404对具有平坦内曲面角的任何边界顶点添加1715正则约束条件。上文在第4.1节中并且结合图11提供了对此的其他细节。例如通过一个或多个CAD程序1404沿着位于第一部分与第二部分之间的边界上的边界边来应用1720边界曲线切线方向传播。上文在第4.1节中提供了对此的其他细节。

[0170] 例如通过一个或多个CAD程序1404应用1725全局连续映射计算方法,其中全局连续映射计算方法与各向异性区域中的主曲率对准,根据局部曲率进行缩放,并且量化以获得映射图像的四边形分区。例如通过一个或多个CAD程序1404应用1730全局映射松弛,以改进全局四边形分区的平滑度。上文在第4.3节中提供了全局连续映射计算和全局映射松弛的其他细节。此外,例如通过一个或多个CAD程序1404应用1735全局曲面逼近方法,所述方法包含网格的第二部分的逼近误差。上文在第4.4节中提供了对此的其他细节。

[0171] 例如通过一个或多个CAD程序1404修改一个或多个可编辑平滑曲面的一个或多个边界,以接触一个或多个建模实体。当至少一个曲面边界有待1740修改时,过程继续进行,并且一旦所有平滑曲面边界已被修改以接触一个或多个建模实体,过程结束。例如通过一个或多个CAD程序1404基于以下的准确度限制为修改设定1750安全公差值:(i) 修改所采用的求交算法(例如,布尔运算)和/或(ii)由生成式设计过程创建的生成式设计的(或所扫描物理对象的)网格表示。上文在第5.3节中提供了有关安全公差值的其他细节。例如通过一个或多个CAD程序1404通过以下方式将可编辑平滑曲面的下一个边界朝向建模实体中的至少一者拉动1755:对针对所拉动边界评估的所述输入实体的距离函数应用梯度下降方法。上文在第5.2节中提供了对此的其他细节。在一些实现方式中,安全公差值被迭代地调节以确保一个或多个经修改的平滑曲面与一个或多个输入实体的一个或多个接触曲线与未经修改的边界同胚。因此,检查1740可包括:检查:在完成对所拉动边界的修改之前,所述边界的曲线与 ∂O 同胚。

[0172] 此外,在一些情况下,拉动算法可在 ∂O 的高曲率区域附近引起小曲面自相交,从而产生有机曲面缺陷。如果曲面自相交与接触曲线重叠 $C = \partial S \cap O$,则求交算法可能无法计算C。为解决此问题,任选步骤可包括:当边界附近的一个或多个区域的曲率超过阈值时,例如通过一个或多个CAD程序1404针对边界的一个或多个区域添加1745一个或多个光顺能量项(Halstead, M.、Kass, M.和DeRose, T.的Efficient, fair interpolation using Catmull-Clark surfaces, Proc. of SIGGRAPH 93, 第35-44页, 1993),从而缓解此问题。

[0173] 本说明书中所述的主题和功能操作的实施方案可以数字电子电路或以计算机软件、固件或硬件(包括本说明书中公开的结构及其等效结构)或以它们中的一者或多者的组合来实现。本说明书中所述的主题的实施方案可使用编码在非暂时性计算机可读介质上以用于由数据处理设备执行或控制数据处理设备的操作的计算机程序指令的一个或多个模块来实现。计算机可读介质可以是制成品,诸如计算机系统硬盘驱动器或通过零售渠道出售的光盘或嵌入式系统。可单独地获取计算机可读介质,并且随后诸如凭借通过有线或无线网络递送计算机程序指令的一个或多个模块来用计算机程序指令的一个或多个模块对其进行编码。计算机可读介质可以是机器可读存储装置、机器可读存储衬底、存储器装置或它们中的一者或多者的组合。

[0174] 术语“数据处理设备”涵盖用于处理数据的所有设备、装置和机器,例如包括可编程处理器、计算机或多个处理器或计算机。除了硬件之外,设备还可包括为所讨论计算机程序创建执行环境的代码(例如,构成处理器固件、协议栈、数据库管理系统、操作系统、运行时环境或它们中的一者或多者的组合的代码)。此外,设备可采用各种不同的计算模型基础设施,诸如网络服务、分布式计算和栅格计算基础设施。

[0175] 计算机程序(还称为程序、软件、软件应用程序、脚本或代码)可以任何合适的编程语言形式(包括编译或通译语言、声明或过程语言)写入,且其可以任何合适的形式部署,包括作为独立程序或作为模块、部件、子例程或适用于计算环境的其他单元。计算机程序不一定对应于文件系统中的文件。程序可存储在保存其他程序或数据的文件的一部分(例如,存储在标记语言文档中的一个或多个脚本)中、存储在专用于所讨论程序的单一文件中或存储在多个协同文件(例如,存储一个或多个模块、子程序或代码部分的文件)中。计算机程序可被部署成在一个计算机上或在多个计算机(其位于一个地点处或跨多个地点分布且通过通信网络互连)上执行。

[0176] 本说明书中所述的过程和逻辑流程可由一个或多个可编程处理器执行,所述可编程处理器执行一个或多个计算机程序以通过对输入数据进行操作并生成输出来执行功能。过程和逻辑流程也可由专用逻辑电路(例如,FPGA(现场可编程门阵列)或ASIC(专用集成电路))执行,并且设备也可实现为专用逻辑电路(例如,FPGA(现场可编程门阵列)或ASIC(专用集成电路))。

[0177] 适合于执行计算机程序的处理器包括例如通用和专用微处理器以及任何种类的数字计算机的任何一个或多个处理器。通常,处理器将从只读存储器或随机存取存储器或两者接收指令和数据。计算机的基本元件是用于执行指令的处理器和用于存储指令和数据的一个或多个存储器装置。通常,计算机还将包括用于存储数据的一个或多个大容量存储装置(例如,磁盘、磁光盘或光盘)或者操作性地耦接到所述一个或多个大容量存储装置以从其接收数据或向其传输数据或者两者。然而,计算机不必具有此类装置。此外,计算机可嵌入另一个装置中,所述另一个装置例如移动电话、个人数字助理(PDA)、移动音频或视频播放器、游戏控制台、全球定位系统(GPS)接收器或便携式存储装置(例如,通用串行总线(USB)闪存驱动器),仅举几例。适用于存储计算机程序指令和数据的装置包括所有形式的非易失性存储器、介质和存储器装置,包括例如半导体存储器装置,例如,EPROM(可擦可编程只读存储器)、EEPROM(电可擦可编程只读存储器)和闪存存储器装置;磁盘,例如,内部硬盘或可移动磁盘;磁光盘;以及CD-ROM和DVD-ROM磁盘。处理器和存储器可由专用逻辑电路补充或并入专用逻辑电路中。

[0178] 为了提供与用户的交互,本说明书中所述的主题的实施方案可在计算机上实现,所述计算机具有用于向用户显示信息的显示装置(例如,LCD(液晶显示器)显示装置、OLED(有机发光二极管)显示装置或另一个监视器)以及用户可通过其向计算机提供输入的键盘和指向装置(例如,鼠标或轨迹球)。其他种类的装置也可用于提供与用户的交互;例如,提供给用户的反馈可以是任何合适形式的感官反馈,例如,视觉反馈、听觉反馈或触觉反馈;并且来自用户的输入可以任何合适的形式被接收,包括声音、语音或触觉输入。

[0179] 计算系统可包括客户端和服务端。客户端和服务端通常彼此远离且通常通过通信网络进行交互。客户端与服务端的关系是借助在相应计算机上运行并彼此具有客户端-服务端关系的计算机程序产生的。本说明书中所述的主题的实施方案可在计算系统中实现,所述计算系统包括后端部件(例如,作为数据服务器)或包括中间件部件(例如,应用程序服务器)或包括前端部件(例如,具有用户可借以与本说明书中所述的主题的实现方式交互的图形用户接口或网络浏览器的客户端计算机),或者为一个或多个此类后端、中间件或前端部件的任何组合。系统的部件可通过任何合适形式或介质的数字数据通信(例如,通信网

络)互连。通信网络的示例包括局域网(“LAN”)和广域网(“WAN”)、互联网络(例如,互联网)以及对等网络(例如,专用对等网络)。

[0180] 虽然本说明书包含许多实现方式细节,但这些细节不应解释为对正要求保护或可要求保护的内容的范围的限制,而是应解释为是对特定于所公开主题的特定实施方案的特征的描述。本说明书中在单独实施方案的上下文中描述的某些特征也可在单个实施方案中以组合形式来实现。相反地,在单个实施方案的上下文中描述的各种特征也可单独地或以任何适合的子组合在多个实施方案中实现。此外,虽然上文可将特征描述为以某些组合起作用,并且甚至最初这样要求保护,但在一些情况下,来自所要求保护的组合的一个或多个特征可从所述组合去除,并且所要求保护的组合可针对子组合或子组合的变型。

[0181] 类似地,虽然在附图中按特定次序示出操作,但这不应被理解为要求按所示的特定次序或按顺序次序执行此类操作,或者要求执行所有示出的操作来实现期望的结果。在某些情况下,多任务和并行处理可为有利的。此外,上述实施方案中的各种系统部件的分离不应理解为在所有实施方案中要求这种分离,并且应理解,所描述的程序部件和系统通常可一起集成在单个软件产品中或封装成多个软件产品。

[0182] 因此,已经描述了本发明的特定实施方案。其他实施方案也在以下权利要求书的范围内。此外,权利要求书中所阐述的动作可按不同次序执行,并且仍然实现期望的结果。

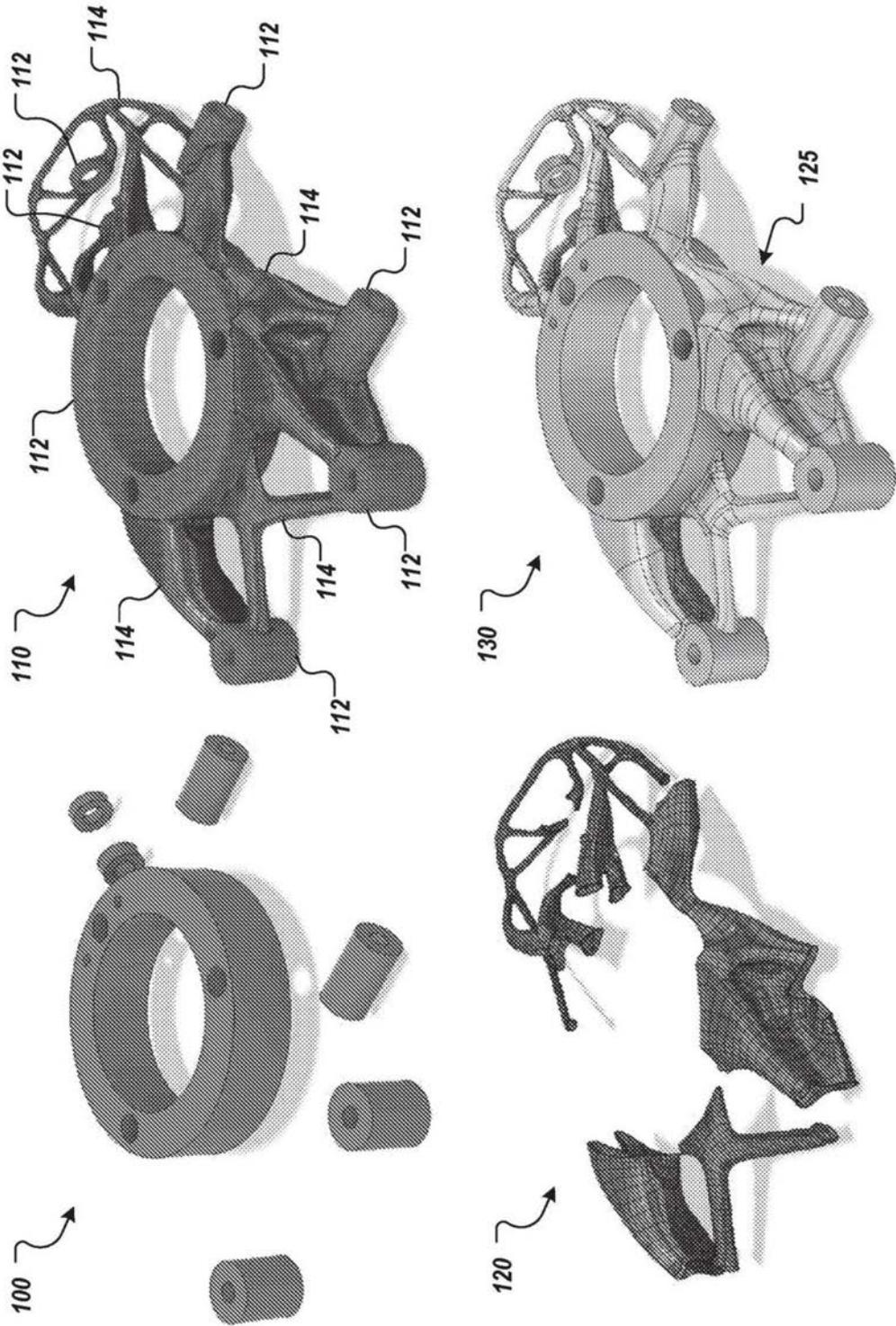


图1

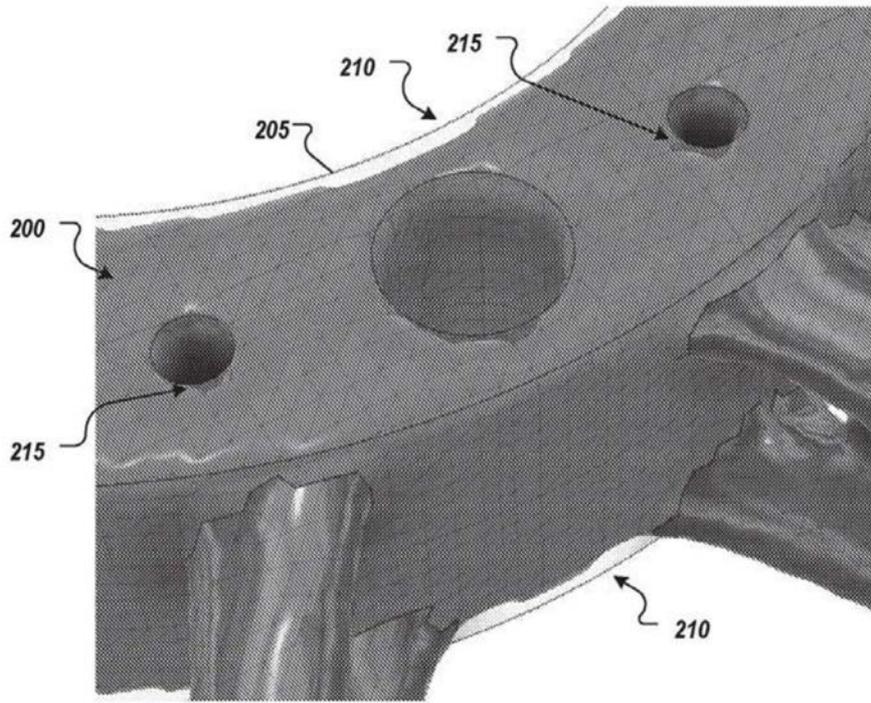


图2

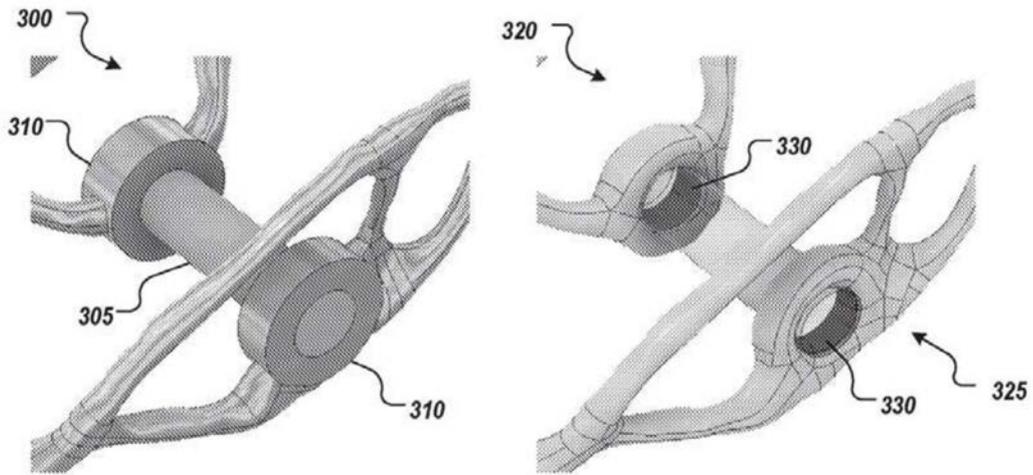


图3

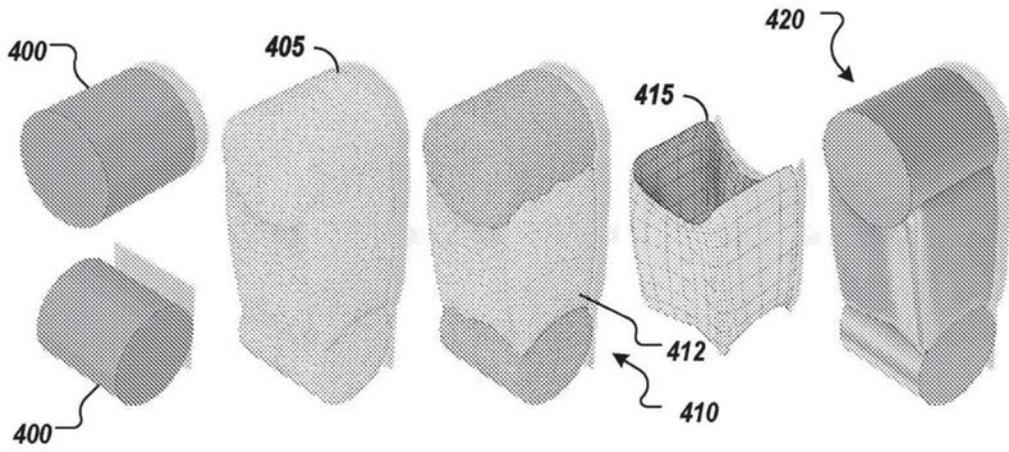


图4

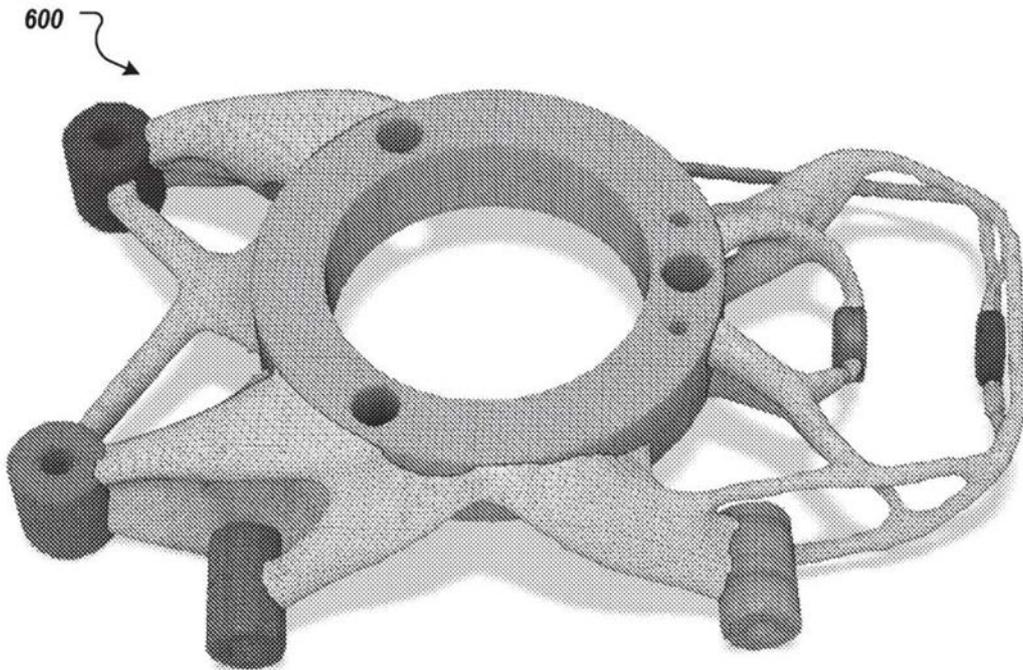


图6

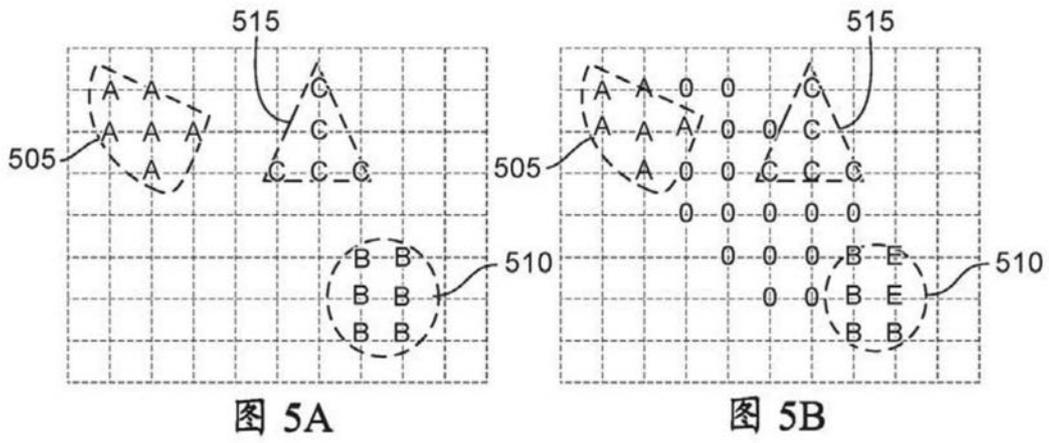


图 5A

图 5B

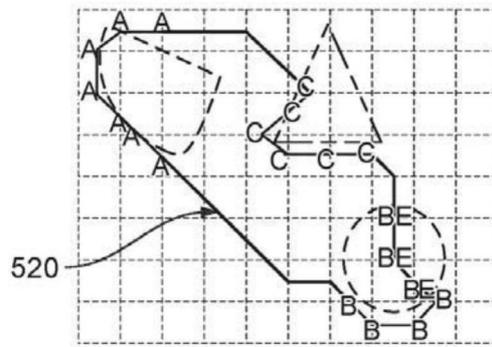


图5C

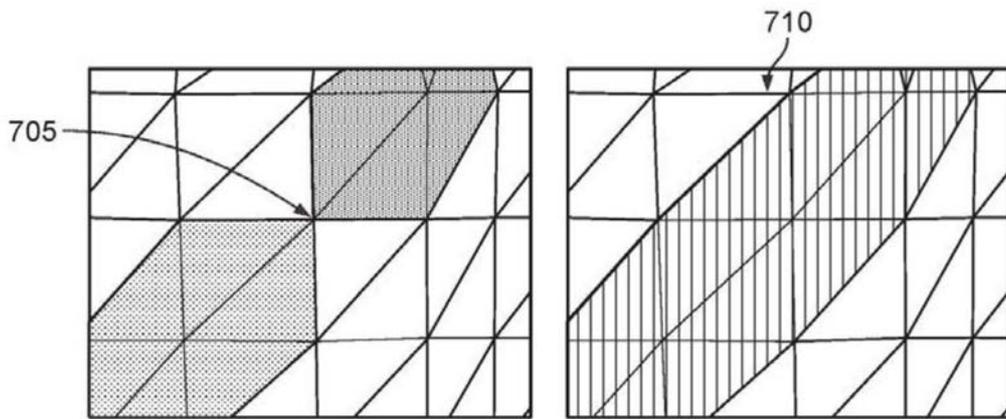


图7

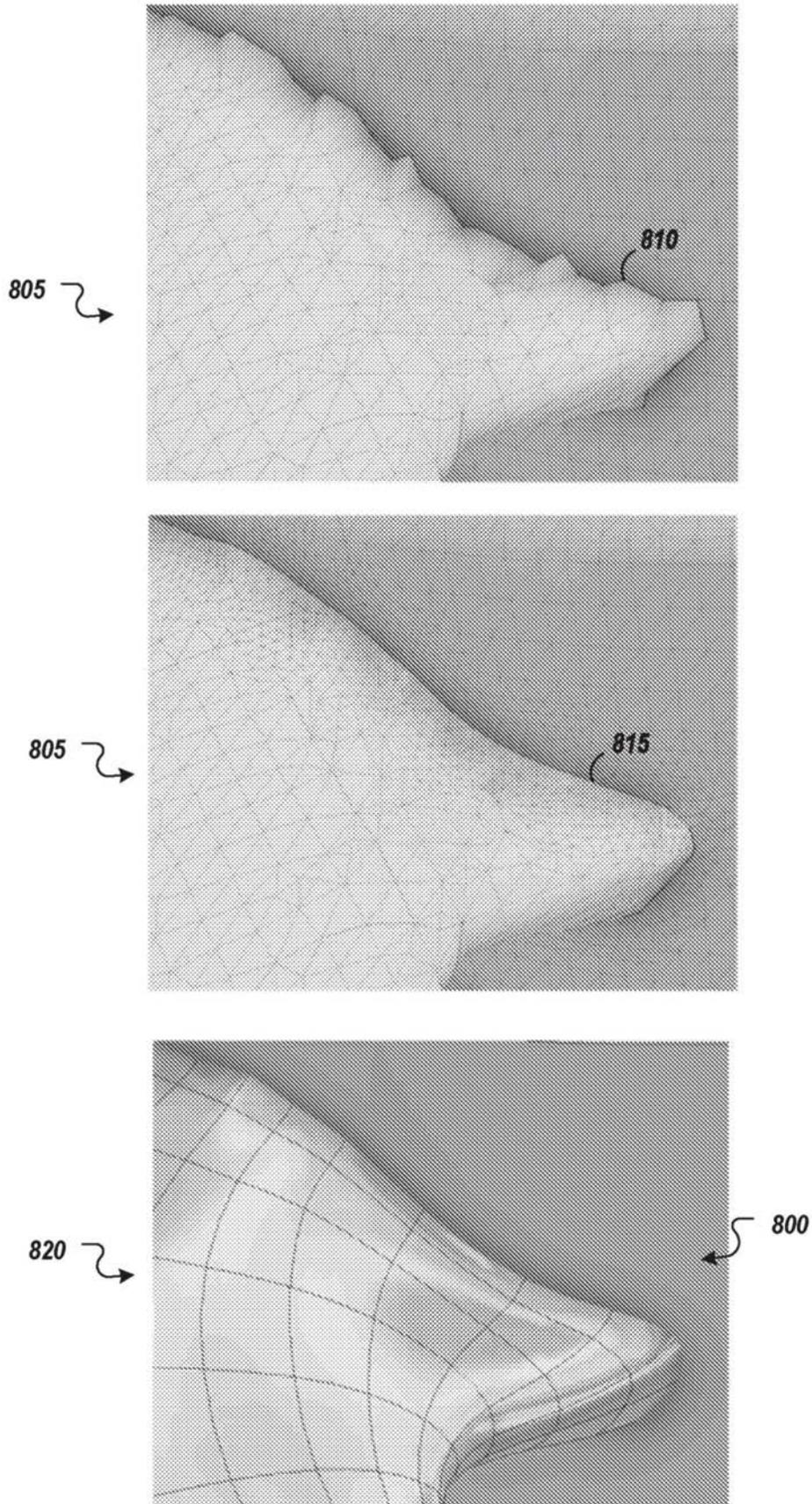


图8

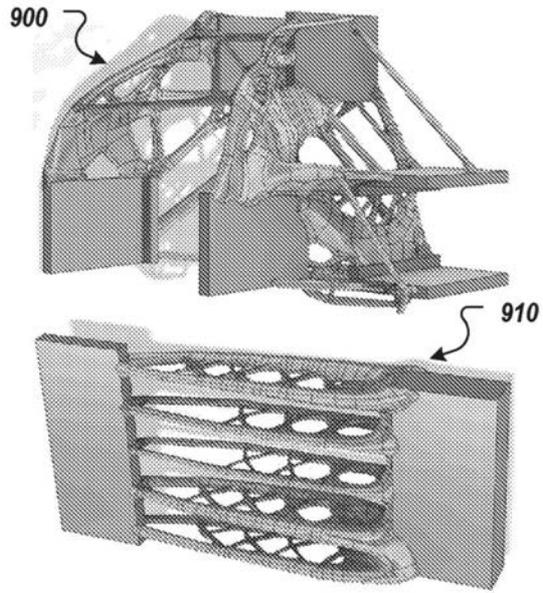


图9

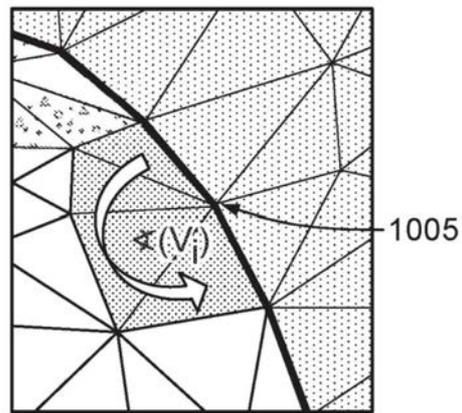


图10

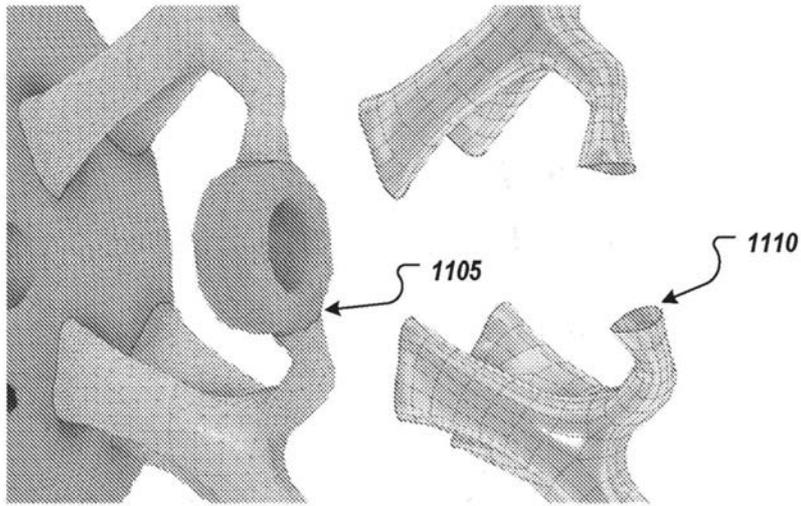


图11

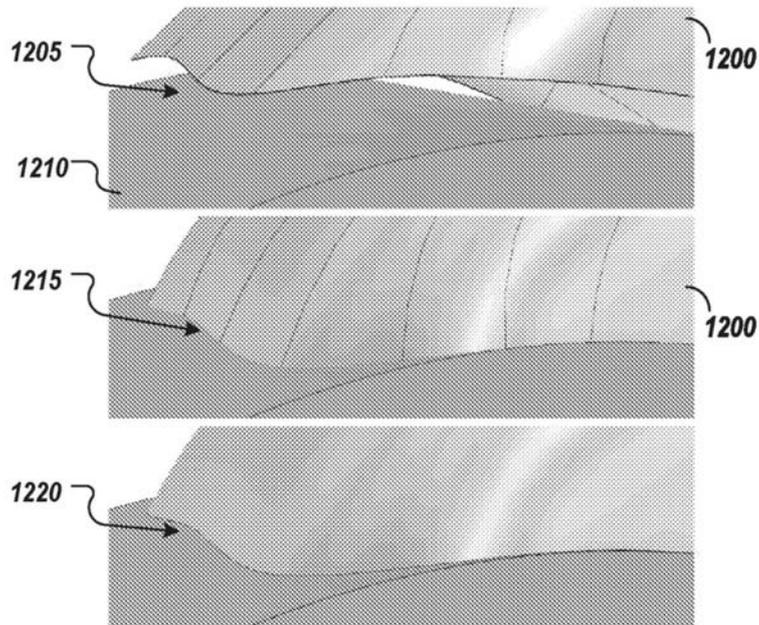


图12

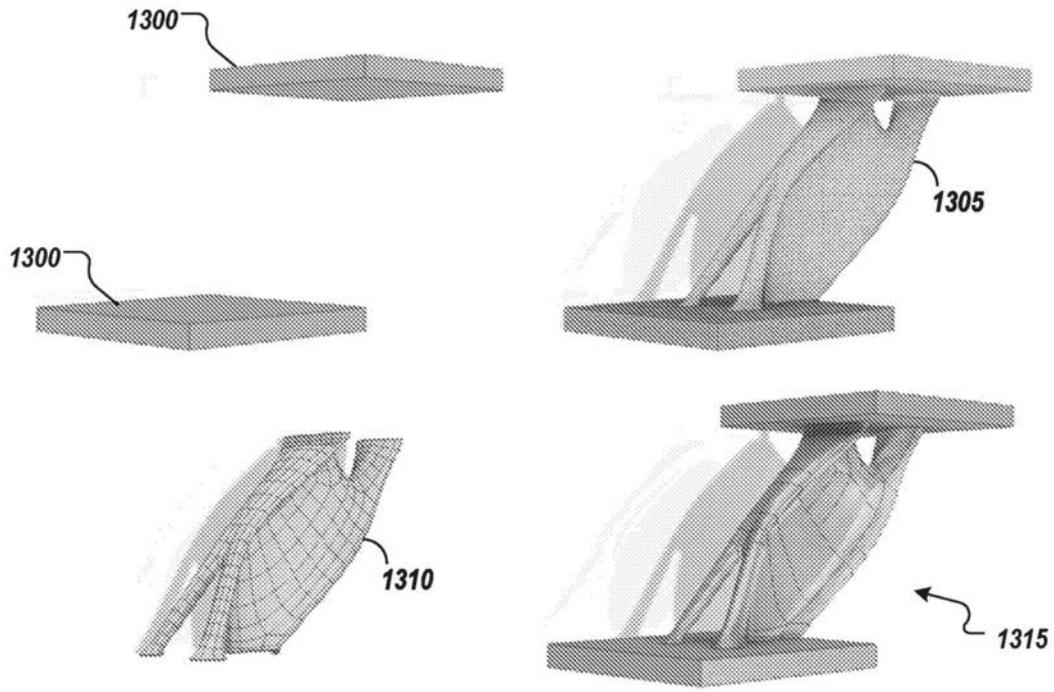


图13

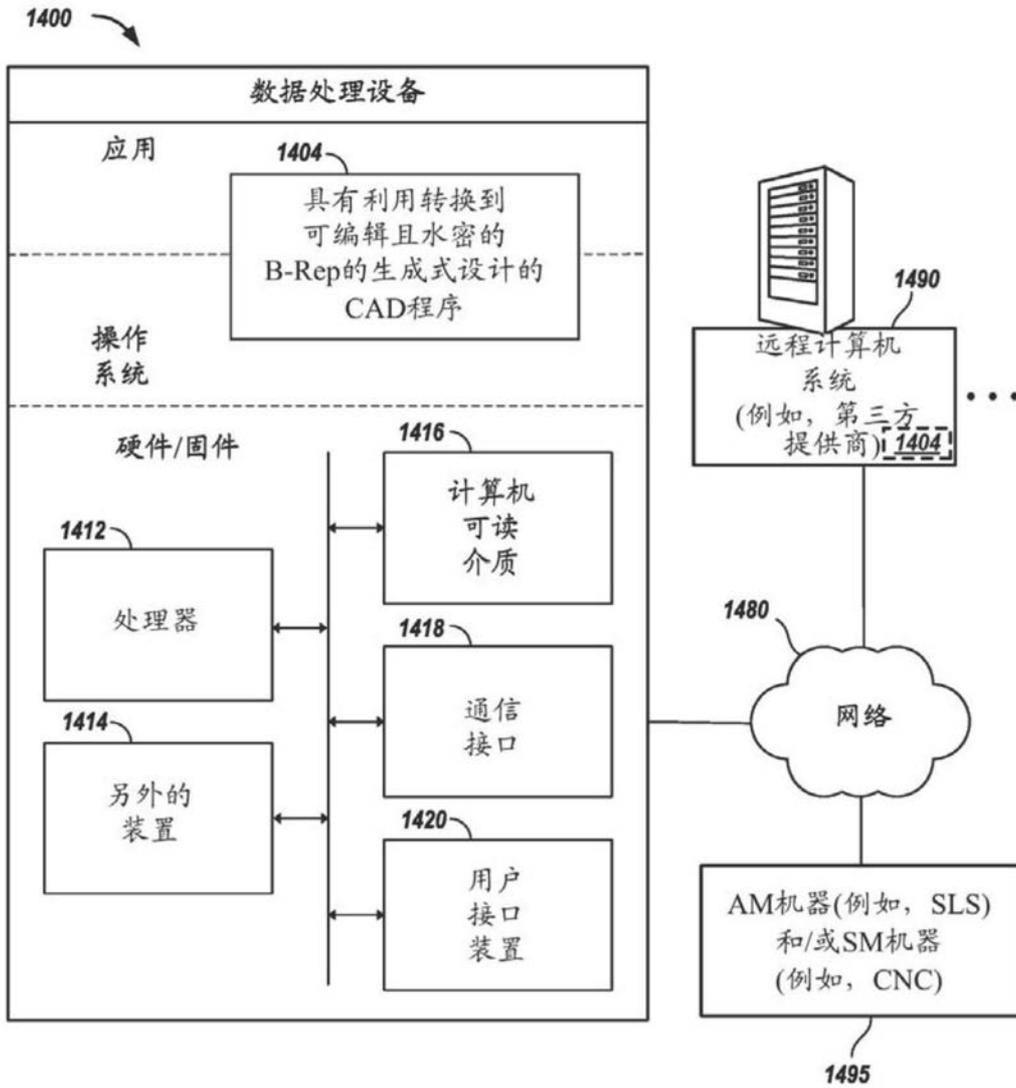


图14

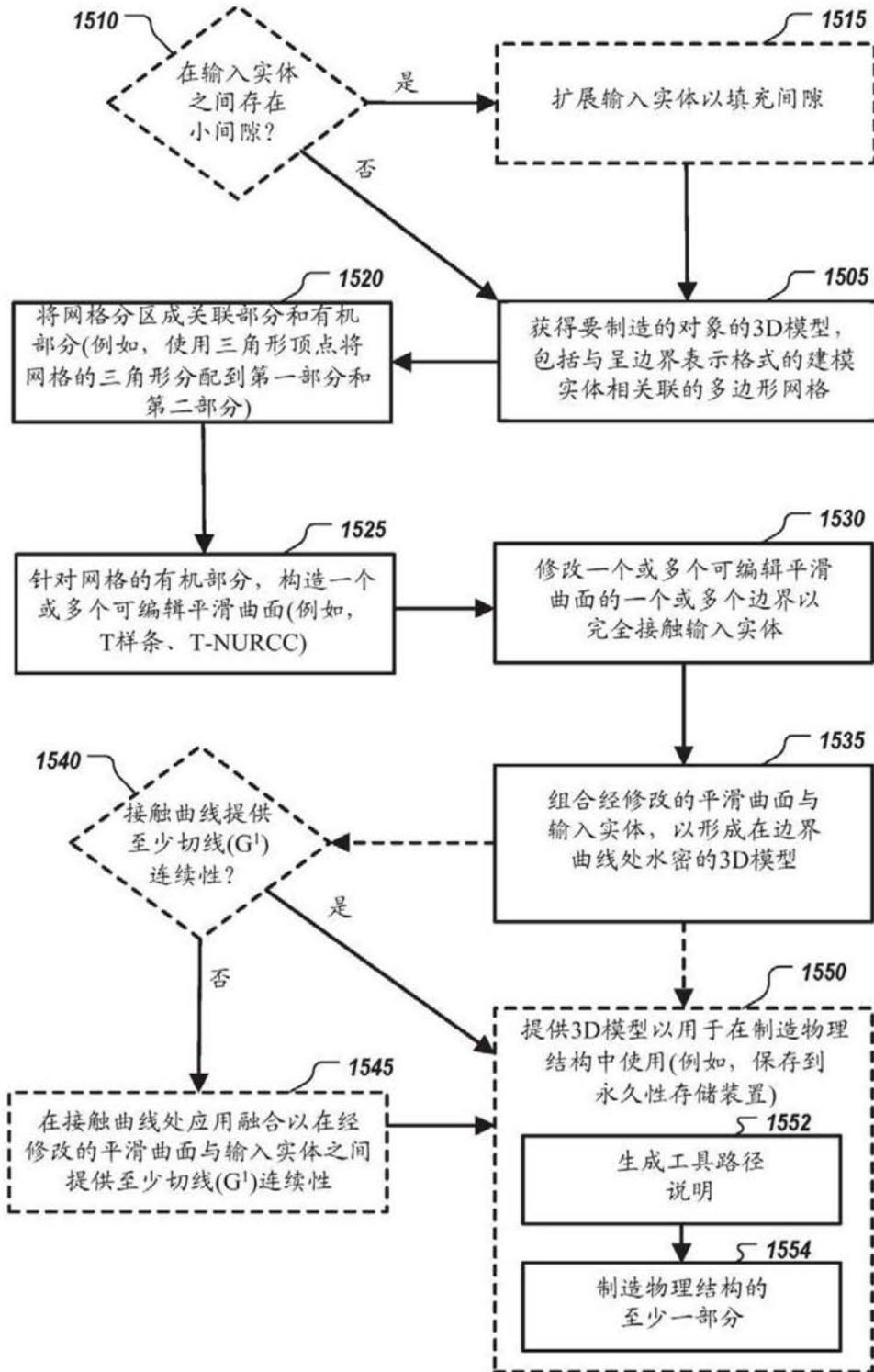


图15

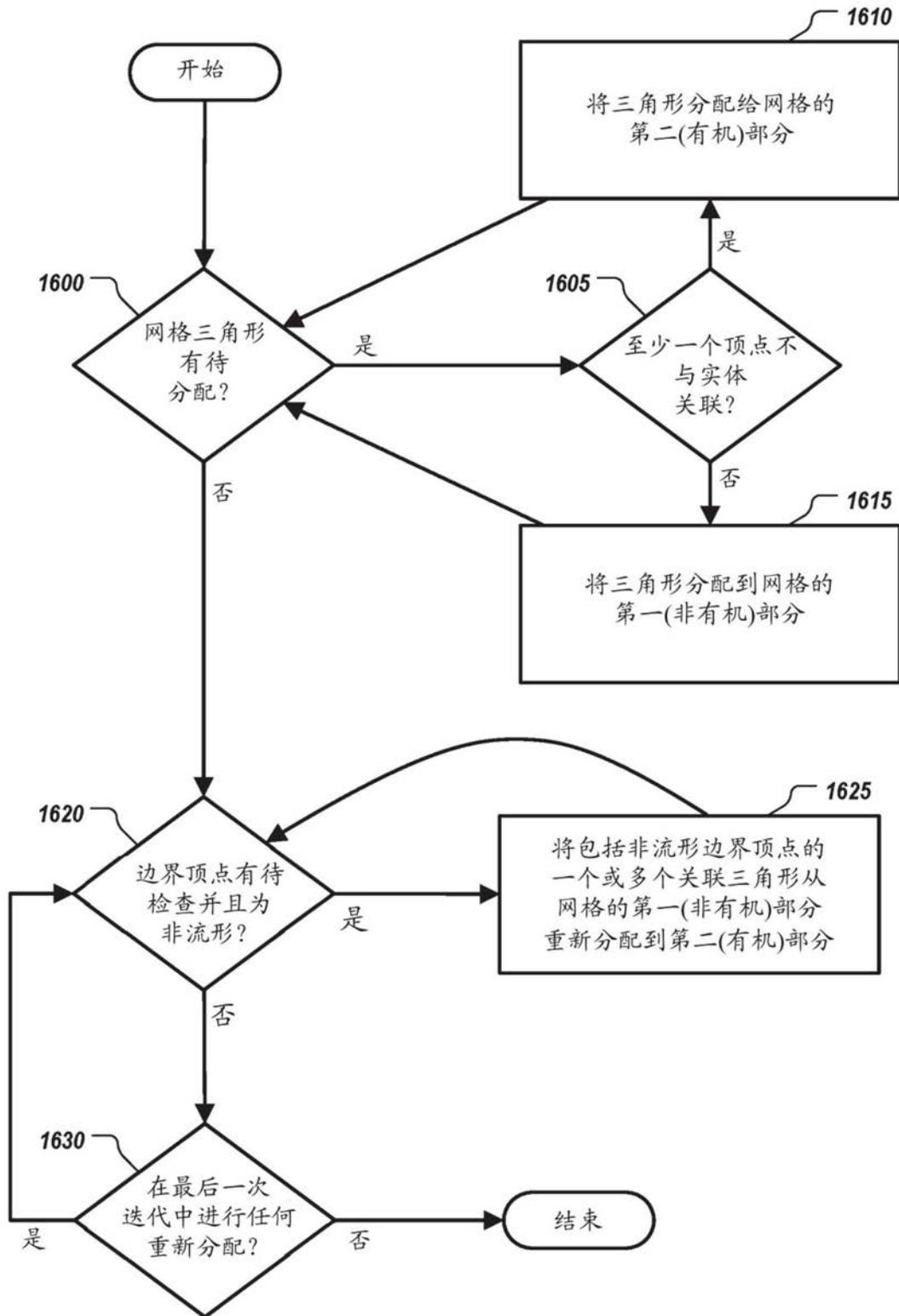


图16

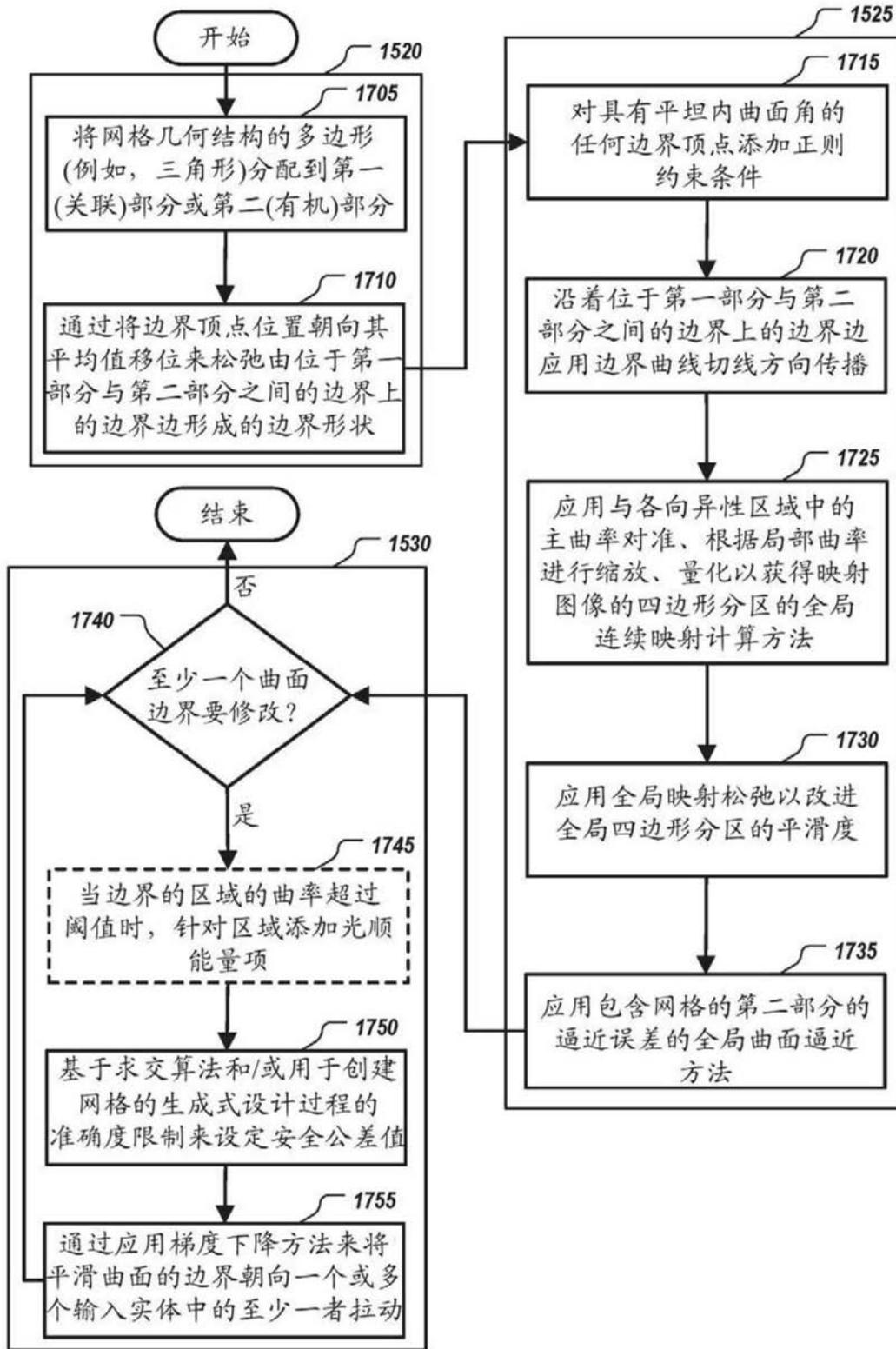


图17