

基于离散点云直接映射 STL 文件的建模技术*

陈明 王群 陈炳森

(同济大学中德工程学院 上海 200092)

摘要: 随着计算机技术的发展,反求工程技术和快速原型技术的结合日趋紧密,纯复制的反求工程已不再适应市场发展的需要,在产品的设计和制造阶段都需要具备创新环节的反求工程技术支持。提出综合优化的方法:对扫描后获取的离散扫描点进行平面的三角剖分及环域间的三角剖分,生成 STL 文件格式,并结合环域划分风格的特点,使用最小权和最小内角最大化相融合的方法,实现二维优化:当二维坐标释放到空间后会破坏三角形形状,影响模型的质量,用增加点的方法,得到三维优化后的原产品模型的 STL 文件格式。在布尔运算的基础上,通过对反求模型的三角网格进行任意叠加和任意截取,产生新产品的 STL 文件格式;对新产品进行总体形状控制、过渡圆角处理等空间优化工作,最终实现新产品创新,缩短了产品的开发周期,降低了开发成本。

关键词: 反求工程 快速原型 STL 文件格式 网格优化 布尔运算

中图分类号: TB22

0 前言

快速原型(RP)技术是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一门新兴技术,它是为了快速响应市场需求变化,缩短产品开发周期而产生的。与快速原型技术交相呼应的反求工程(RE)是在现有实体测量数据的基础上重构其三维 CAD 信息模型的过程,将反求出的模型加以转换,就可以被快速原型系统所接受。为了将反求工程与快速原型相结合,使之不再成为快速产品开发中的瓶颈问题,有必要对适合于 RE/RP 的集成进行系统的研究,这也是当前制造领域正在研究的课题之一。

离散点云数据曲面造型技术是快速原型制造的关键。目前,基于离散点云数据的 RE/RP 集成方法可概括为以下三种:①测量数据(点云数据)→CAD 模型→STL 文件格式→RP 系统切片数据文件;②测量数据(点云数据)→RP 系统切片数据文件;③测量数据(点云数据)→STL 文件格式→RP 系统切片数据文件。方法①通过 CAD 建模过程实现 RE 与 RP 系统的集成,在 CAD 建模过程中可以对产品模型进行修改设计或者创新开发,而且可以利用 CAD 模型在现有 CAD/CAM 系统中进一步完成 CAE、CAPP、NC 编程等任务。

目前,一般都是使用基于 NURBS 和 TBS 建模理论的通用 CAD/CAM 系统,通过 STL 文件提供与 RP 系统的数据接口,解决了与 RP 系统的集成问题。虽然现有 CAD/CAM 系统(如 Pro/Engineering)都有

将 CAD 模型转换成 STL 文件的功能,这使方法①具有很强的通用性;另外,由于存在 CAD 模型转换成 STL 文件格式的过程,使方法①具有良好的编辑、修整平台。但是,由于 STL 文件的结构较为简单,没有几何拓扑连接上的要求,使得转换的 STL 模型出错的可能性加大,从而导致在快速原型制造中经常出现裂纹、孤立面、顶点错误、法向量错误、重叠面等缺陷,使后期优化工作的难度增强。对于表面特征非常复杂而且毫无规律的零件而言,要根据表面点云数据构造表面 CAD 模型,再把这个封闭的表面模型进行 STL 三角划分,实现起来十分困难。

方法②从形式上看是过程最简单的方法,直接从零件测量数据产品 RP 系统可以接受的切片数据,绕开了通常需要的熟练技巧、经验以及繁琐、费时的 CAD 建模环节,实现 RE 与 RP 系统直接集成,但由于在集成过程中缺乏必要的对产品模型进行修改的手段,无法对扫描点中的一些遗漏和错误进行修改,所以测量数据必须足够密集才能保证输出的 RP 模型精度要求,RP 模型表面质量会比较低,并且特别容易存在缝隙。

综上所述,方法①具有 CAD 模型转换成 STL 文件过程的缺陷;方法②保形性和模型精度较差,又无法对模型进行改进。而从方法③可以看出本选题的明显优势在于:由于 STL 文件格式的存在,既避免了数据多次转换以及 CAD 模型转换为 STL 文件可能出现的上述问题,又能通过 STL 文件格式的二次设计来满足对模型的任意整合和截去,从而使产品创新成为可能。为此,提出离散点云直接映射 STL 文件格式的新产品开发建模技术。

* 国家 863 计划(2002AA414110)和上海市“十五”重点科技攻关(021111126)资助项目。20051104 收到初稿,20060706 收到修改稿

1 离散点云直接映射 STL 文件格式的建模技术

1.1 基于离散点直接映射 STL 文件格式的平面三角划分及其优化研究

基于离散点直接映射 STL 文件格式平面三角划分及其优化的具体步骤如下所述。

(1) 通过扫描仪器或相关的测量仪器,获得的三维采样自由复杂曲面新产品零件的空间离散数据点,将测量数据点集向平面投影,在平面中的三角划分。将点集 V 中所有的 z 轴坐标隐去,将得到的点集称为 S ,如图 1 所示,并计算点集 S 中 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 的最大值,其对应点设为 P_1 。

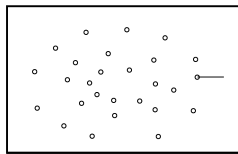


图 1 投影到平面上的测量数据点

(2) 由最右端的顶点 P_1 引一水平线,以 P_1 为圆点,绕 P_1 从水平线方向开始逆时针旋转,当碰到点集中的第一个点时,即旋转角度最小,把该点记为 P_2 ,然后以 P_2 点为圆点,从 P_1P_2 连线的方向开始绕逆时针方向旋转,当碰到点集中最近点时记下该点为 P_3 ,如图 2 所示。

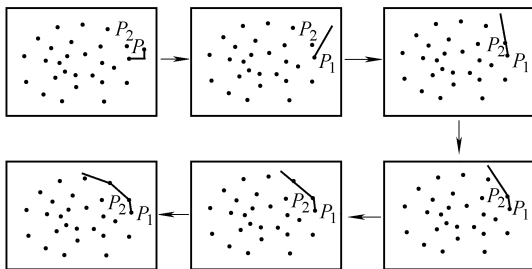


图 2 划分环域

(3) 进行划分环域,即 $j \leftarrow 1, k \leftarrow 1, m \leftarrow 2$,以 $P_j P_{j+1}$ 代替 $P_{j-1} P_j$ ($P_0 P_1 = l_R$),计算 $P_{j+1} P_i$ 与 $P_j P_{j+1}$ ($i = k, \dots, n$) 的夹角 $(P_{j+1} P_i, P_j P_{j+1})$ 及最小夹角 $(P_{j+1} P_i, P_j P_{j+1})$, 设为 a_m 。 a_m 另一条边的端点即凸壳顶点记为 P_k 。由本步骤上述操作,依次循环形成第一个环域,如图 3 所示。

(4) 将第一个环域各个顶点的坐标记录下来,存入一个点集中,即 P_1, P_2, \dots, P_m , 设为 $C_1 = \{P_1^1, P_2^1, \dots, P_m^1\}$ 。然后开始第二环的环域划分,将第二环的点数据记

录下来,存入 $C_2 = \{P_1^2, P_2^2, \dots, P_m^2\}$ 中,继续下去,重复操作,直到最里面的点为止,最终结果如图 4 所示。

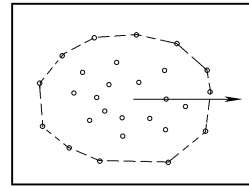


图 3 形成的第一个环域

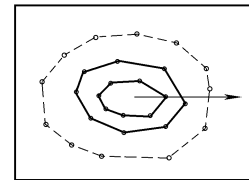


图 4 环域划分的最终结果

(5) 对最内环的离散点进行最小权划分。最小权三角划分:当三角剖分边的总长度减至最小时,称为最小权三角剖分。图 5 中两个三角形的边长总和为: $C_1 = a + b + c + d + L_1$, $C_2 = a + b + c + d + L_2$ 。因为 $L_2 < L_1$,所以 $C_2 < C_1$,得到最小权的结果。逐点剖分,结果如图 5 所示。

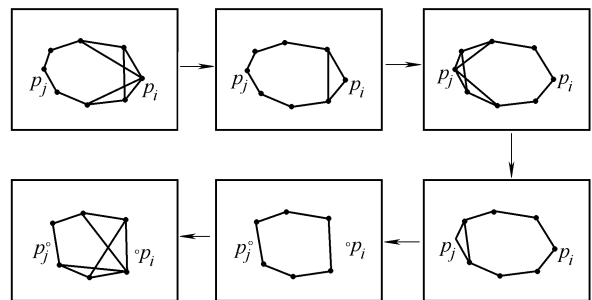


图 5 内环三角划分

(6) C_i 与 C_{i-1} 之间环域的划分,连接内环上线段的两个端点与外环上离这两个点最近的端点,选择其中夹角最大的连线,如图 6 所示。

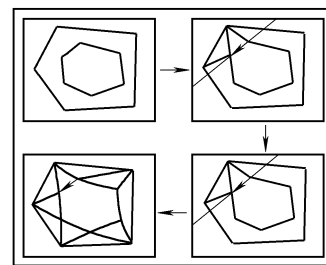


图 6 相邻环域的三角划分

(7) 相邻环域三角划分之后,整体点集就完成了基础的划分过程,其结果如图 7 所示。

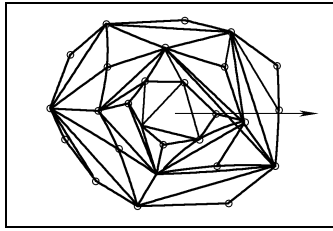


图7 整体点集环域划分结果

由于受被测件形状和平面扫描点数的影响，当点数少、形状复杂，特别是有突变情况会形成狭长三角形。由此，需要通过平面优化得到最终结果，也是理想的结果，如图8所示。

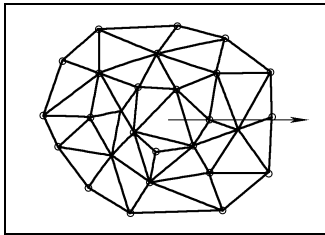


图8 优化之后的结果

1.2 基于离散点直接映射 STL 文件格式的空间优化研究

离散点云受位置的约束，由二维释放到三维坐标优化后，由于某些z方向的梯度变化太大，某些三角形的一条或两条边被拉长，从而产生狭长三角形，具体情况如图9所示。因此对于经过二维优化好的网格再进行三维优化是很有必要的。

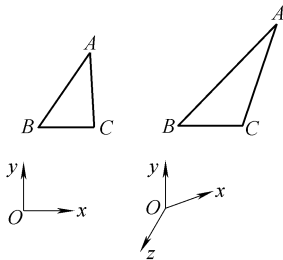


图9 转三维后拉长的网格

三维优化的实现需要以下前提条件。

(1) 狭长三角形的判定方法是以最小内角小于 20° 作为标准，从最外层的空间网格开始遍历的。

(2) 为了循环叙述方便，使用两套下标表示，初始值为： $i=i', j=j', k=k', m=m', n=n'$ 。

基于离散点直接映射 STL 文件格式的空间优化步骤如下所述。

(1) 在三角形网格库中寻找 P_i, P_j, P_k (i, j, k 为任意值) 构成 $\Delta P_i P_j P_k$ ，若找不到，跳转到步骤(11)；若找到，则进入下一步，见图10。

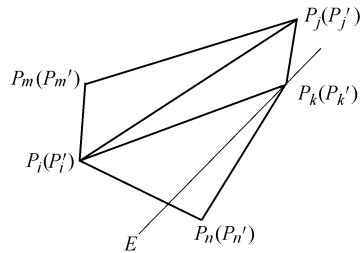


图10 空间网格

(2) 判断 $\Delta P_i P_j P_k$ 是否为狭长三角形，若不是跳转到步骤(1)；若是，则进入下一步。

(3) 寻找以 $P_i P_k$ 、以 $P_i P_j$ 为边的三角形的另外两个坐标点 P_m, P_n (m, n 为任意值)，若找不到，跳转步骤(1)；若找到，则构成五边形 $P_i P_m P_j P_k P_n$ ，进入下一步。

(4) 过 P_k' 作垂直于 $\Delta P_i P_m P_j'$ 的平面 E ，如果满足 $\Delta P_k P_m P_j'$ 在平面 E 的一边时，则这条边满足 E 面判断要求，进入下一步；若不在同一边，则跳转到步骤(6)。

(5) 变化编号达到交换边的目的，对其他边进行 E 面判断(图11)，令临时量为 $i', n'=i', k'=n', j'=k', p'=m', m'=i'$ ，判断是否循环完成了5次，如果不是，跳转到步骤(2)；若是，则跳转到步骤(9)。

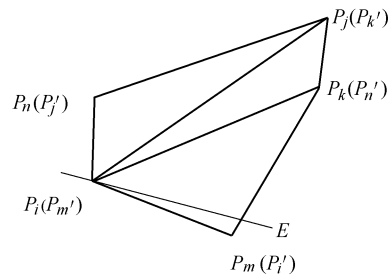


图11 编号交换后网格

(6) 判断是否已经通过找到以 $P_i P_k$ 为边的对应三角形顶点 P_o 重建过五边形，若不是，跳转到步骤(9)；若是，则进入下一步。

(7) 判断是否是第二次重建五边形，若是，跳转到步骤(1)；若不是，则进入下一步。

(8) 变化编号以达到新的 P_o 点构成五边形，如图12所示。若 $j'=0, m'=j$ ，则转到步骤(4)。

(9) 变化编号以达到用新的 P_o 点构成五边形，如图13所示。令临时量为 $i', n'=0, k'=j, j'=m, m'=i, k'=i'$ ，跳转到步骤(4)。

(10) 选取 $\Delta P_i P_j P_k$ 的内心 O ，连接 $OP_i', OP_j', OP_k', OP_j', OP_k'$ ，构成五个新三角形，如图14所示。同时原数据库中作相应改变，跳转到步骤(1)。

(11) 遍历完成。

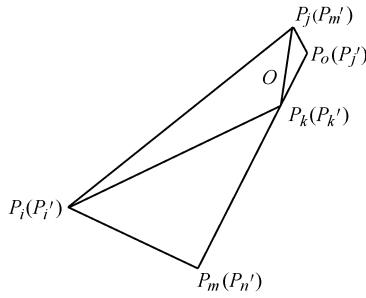


图12 重建的网格

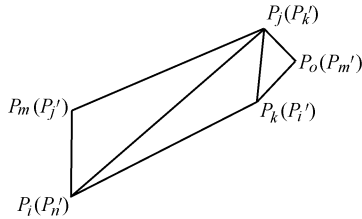


图13 重建后编号变化的网格

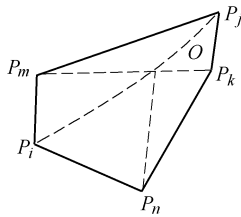


图14 空间网格优化

2 基于离散点云直接映射 STL 文件格式的产品创新

在反求工程中,产品创新很大程度上是在原有产品的基础上进行变形、改进的。对于算法的要求可以在原有产品的基础上任意添加或截去。由此,在产品创新中把运算方法归结为两类:①任意实体的整合。②任意实体的截去。

2.1 任意实体整合算法

任意实体整合算法如下所述。

(1) 选取两个任意目标实体的散乱点云数据, $S_1 = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$, $S_2 = \{b_1, b_2, b_3, \dots\}$ 。

(2) 截取选用的实体部分, $S'_1 = \{a'_1, a'_2, a'_3, \dots\}$, $S'_2 = \{b'_1, b'_2, b'_3, \dots\}$ 。

(3) 将实体点云进行三角网格化,生成 STL 文件格式。

$$\text{STL}_1 = \{(P_1, P_2, P_i, n_1)_1 \rightarrow (P_2, P_i, P_j, n_2)_1 \rightarrow (P_i, P_j, P_k, n_3)_1 \rightarrow \dots\}$$

$$\text{STL}_2 = \{(P_1, P_2, P_i, n_1)_2 \rightarrow (P_2, P_i, P_j, n_2)_2 \rightarrow (P_j, P_k, n_3)_2 \rightarrow \dots\}$$

(4) 进行网格点的坐标归一。以 STL_1 为基准坐标,则坐标平移得

$$\text{STL}_2 = \{(P_1 + \Delta p_1, P_2 + \Delta p_2, P_i + \Delta p_i, n_1 + \Delta n_1)_2 \rightarrow (P_2 + \Delta p_2, P_i + \Delta p_i, P_j + \Delta p_j, n_2 + \Delta n_2)_2 \rightarrow \dots\}$$

坐标旋转得

$$S_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & \cos \beta_2 & \cos \beta_3 \\ \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \cos \delta_1 & \cos \delta_2 & \cos \delta_3 \end{bmatrix} S_1$$

(5) 确定两个实体的相对位置,判断是否有重叠部分,有则转到步骤(8),无则转到步骤(7)。如果 $\text{STL}_1 \cap \text{STL}_2 = \Phi$, 当 $\Phi = \{0\}$ 时转到步骤(6); 当 $\Phi \neq \{0\}$ 时转到步骤(7)。

(6) 将两个实体的 STL 点集进行布尔和运算, $\text{STL}_1 \cup \text{STL}_2 = \text{STL}_3$, 然后转到步骤(9)。

(7) 将两个实体的 STL 点集进行布尔交运算 $\text{STL}_1 \cap \text{STL}_2 = \Phi$ 。

(8) 删去重叠部分 Φ , 并生成结合面 A 。

(9) 选取结合面 A 上三点重合。设 $\{(P_1, P_2, P_i, n_1)_1, (P_x, P_y, P_z, n_n)_1, (P_i, P_j, P_k, n_m)_1\}$ 和 $\{(P_1, P_2, P_i, n_1)_2, (P_x, P_y, P_z, n_n)_2, (P_i, P_j, P_k, n_m)_2\}$ 分别为两实体结合面上的点,且对应重合。

(10) 生成新实体的 STL₃ 文件格式。

2.2 任意实体截去算法

任意实体截去算法如下所述。

(1) 扫描主实体,获取散乱点云 $P_1 = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$ 。

(2) 设计截去实体的形状,获取散乱点云, $P_2 = \{b_1, b_2, b_3, \dots\}$ 。

(3) 分别确定目标实体与截去实体的 X_{\max} 为起始点。

(4) 对目标实体由外向里地进行综合三角划分,生成 STL 文件格式

$$\text{STL}_2 = \{(P_1, P_2, P_i, n_1)_1 \rightarrow (P_2, P_i, P_j, n_2)_1 \rightarrow (P_i, P_j, P_k, n_3)_1 \rightarrow \dots\}$$

(5) 对截去实体由外向里地进行综合三角划分,生成 STL 文件格式

$$\text{STL}_2 = \{(P_1, P_2, P_i, n_1)_2 \rightarrow (P_2, P_i, P_j, n_2)_2 \rightarrow (P_i, P_j, P_k, n_3)_2 \rightarrow \dots\}$$

(6) 确定目标实体的坐标系

$$p_1 = \{a_1(x_1, y_1, z_1), a_2(x_2, y_2, z_2), a_3(x_3, y_3, z_3)\}$$

(7) 确定截去实体的坐标系

$$p_2 = \{b_1(x_1, y_1, z_1), b_2(x_2, y_2, z_2), b_3(x_3, y_3, z_3)\}$$

(8) 目标实体与截去实体的坐标归一。以目标实体的坐标为基准，则平移坐标得

$$p_2 = \{b_1(x_1 + \Delta x_1, y_1 + \Delta y_1, z_1 + \Delta z_1), b_2(x_2 + \Delta x_2, y_2 + \Delta y_2, z_2 + \Delta z_2) \dots\}$$

(9) 坐标旋转得

$$P_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & \cos \beta_2 & \cos \beta_3 \\ \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \cos \delta_1 & \cos \delta_2 & \cos \delta_3 \end{bmatrix}$$

(10) 在目标实体上找到与截去实体的 n 个交面 $A = \{f(x_1, y_1, z_1), f(x_2, y_2, z_2), \dots, f(x_n, y_n, z_n)\}$, $x \in p_1$ 。

(11) 删除目标实体上交面内的点数据 A 。

(12) 确定两实体的相对位置，并选取面上三点重合。设 $\{(P_1, P_2, P_i, n_1)_1, (P_x, P_y, P_z, n_n)_1, (P_i, P_j, P_k, n_m)_1\}$ 和 $\{(P_1, P_2, P_i, n_1)_2, (P_x, P_y, P_z, n_n)_2, (P_i, P_j, P_k, n_m)_2\}$ 分别为两实体结合面上的点，且对应重合。

(13) 对截去实体进行法矢计算，并取异号。

(14) 对目标实体和截去实体的计算结果进行布尔差运算， $STL_1 \cup STL_2 = STL_3$ 。

(15) 生成新实体的 STL_3 文件格式。

新产品 STL 文件格式产生后，需要做新锥形的空间优化工作。此项工作主要包括总体形状的控制、过渡圆角的处理、特殊情况的处理，总体框架如图 15 所示。

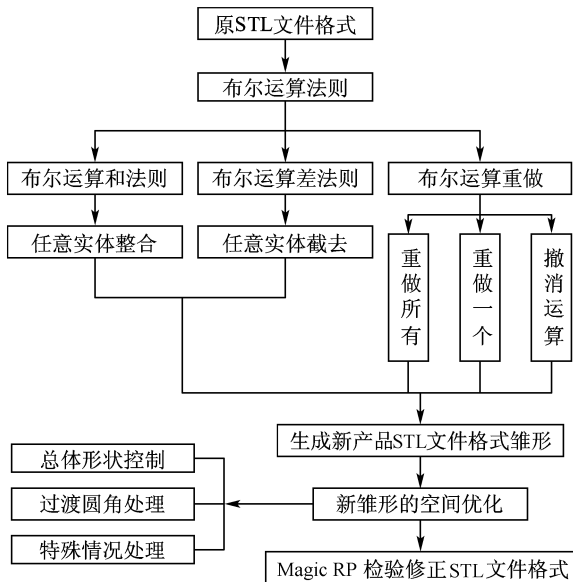


图 15 STL 文件格式二次设计的框架

总体形状的控制一般是在新锥形生成后，需要做外形的微调，如线或面的曲率改变等。

过渡圆角的处理是指模型在衔接处或交接面的工艺处理。可以是尖角、过渡圆角，也可以是在原

有圆角的基础上修改等。

当然，不排除特殊情况的处理，如对复杂模型的处理。

3 实例与分析

采用本算法在优化前、后的网格，如图 16、17 所示。对比两图中的 1、2 部分，可以明显地看出，图 16 中出现狭长三角形部分，图 17 中得到了完全的改善，这说明此优化方法解决了空间网格中的狭长三角形，完成了空间优化的基本要求，对提高模型精度有着重要意义。

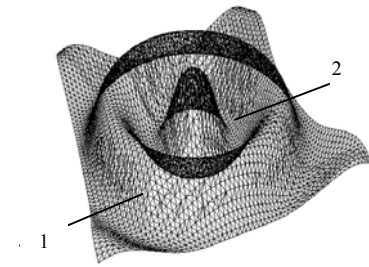


图 16 优化前

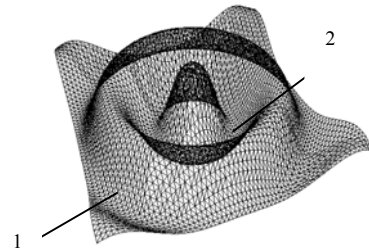


图 17 优化后

以布尔运算的基本法则为基础，由图 18 可见，通过 STL 文件格式二次设计实现新产品开发和产品变异设计的效果。通过基本圆柱 2 和半球 1 叠加后，在相关位置分别减去 4 和 5 的实体，最终产生 3 的实体模型。

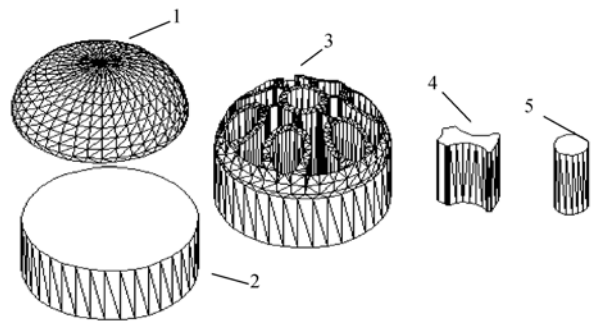


图 18 在基本圆柱和半球基础上的产品创新
1. 半球 2. 基本圆柱 3. 实体模型 4、5. 实体

通过图 19 所示箱体分析，如果综合应用 STL 文件格式的二次设计，可在主箱体的基础上叠加 1、2

凸缘,然后截去凸缘上相应的孔,从而获得整个箱体。

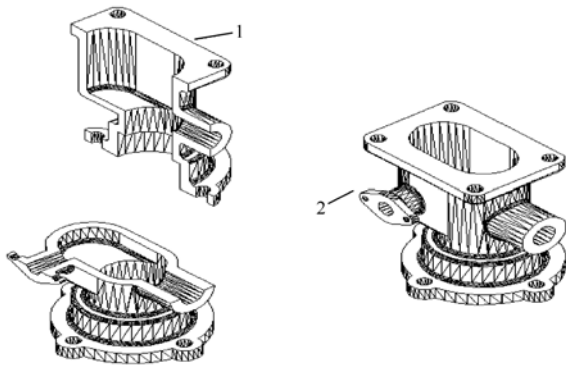


图 19 任意实体整合和任意实体截去的综合应用

4 结论

基于离散点云直接映射 STL 文件建模技术不仅能在算法上保证反求模型质量,而且在新产品开发中采用基于 STL 文件的二次设计,能够在原有产品的模型上,通过添加或截去任意形状的实体,使得原有产品在形状、结构和功能等方面得到改变,为反求工程中的新产品开发可开辟一条新路。

参 考 文 献

- [1] 王群,李爱平,马淑梅.局部网格狭长三角形的品质改善及实现[J].同济大学学报(自然科学版),2004(11):75-78.
- [2] 王群,李爱平,黄治钟.基于新产品开发中 STL 文件格式的二次设计[J].组合机床与自动化加工技术,2005(9):16-17.
- [3] 周培德.计算几何——算法分析与设计[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [4] 王群.基于离散点云直接映射 STL 的关键建模技术的研究[D].上海:同济大学,2005.
- [5] CHEN Y H , WANG Y Z. A gas based approach to re-triangulation and data reduction in reverse engineering [C]//Proceedings of ICAMT, Xi'an, 1999: 603-607.

MODELING TECHNOLOGY BASED ON SCATTER CLOUD MAPPED STL FILE DIRECTLY

CHEN Ming WANG Qun CHEN Bingsen
(Sino-German School of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The pure copying in reverse engineering (RE) has already been adapted to the developing market no longer. The integration of RE and rapid prototyping (RP) is gradually closed daily with the development of the compute technique. The innovation of RE techniques is required during the process of product's designing and manufacturing. The synthetical optimization is put forward: the scatter points got after scanning and circularities are triangulated, and the format of stereo lithography file (STL) is created, the 2D optimization is realized with the method of the least right and the method of the least internal angle becoming maximum based on the specialty of the mesh and combined the peculiarity of the circularity partition. The 3D optimization is fulfilled with points adding according to the specialty of the mesh, and then the deformation of the triangles after mapping onto 3D is avoided. With the Boolean operation, the STL format of new product model is formed by arbitrarily the entity's integration and arbitrarily truncating of entity. The 3D optimization is realized by shape control and other treatments of new product model, therefore, the time and the cost of new product development is reduced.

Key words: Reverse engineering (RE)

Rapid prototyping (RP)

Stereo lithography file(STL)

Mesh optimization

Boolean operation

作者简介: 陈明,男,1964年出生,博士研究生,副教授。主要研究方向为机械制造及其自动化。

E-mail: cdhawcm@yahoo.com.cn