

面向 CAE 的 STL 模型三角网格均匀化^①

陈志杨¹, 丁 豪¹, 张 引²

¹(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310023)

²(浙江大学 计算机学院, 杭州 310012)

摘 要: 提出了一种基于 STL 数据的有限元网格再生成算法, 该算法主要用于 CAE 工程分析. 鉴于 CAD 模型的网格特征形态不匀称, 分布不均匀的特点, 对 CAD 模型进行网格再生成, 使其符合 CAE 工程分析的要求. 算法主要由拓扑建立、网格聚类、网格重采样和三角化四部分组成. 实验表明该算法能够有效降低三角网格最长边和最短边的比值, 使得模型的网格特征形态趋于均匀.

关键词: 三角网格均匀化; 有限元网格生成; STL 模型; CAD

Re-Shape of Triangular of STL Model for CAE Applications

CHEN Zhi-Yang¹, DING Hao¹, ZHANG Yin²

¹(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

²(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The paper presents an algorithm of the Finite Element mesh generation based on STL Data. The algorithm is mainly used for CAE engineering analysis. Considering the bad shape of STL model from CAD system, we need re-meshing the STL model so that the shape of triangular is better use for CAE analysis. The algorithm includes 4 steps: topologic creation, mesh clustering, mesh re-sampling, triangulation. The results show that our algorithm can reduce the ratio of the longest edge and the shortest edge of triangle mesh effectively to make shape of triangular is in uniform.

Key words: uniform of triangular mesh; CAE grid; STL model; CAD

工程分析是指对工程加以分析、调查, 找出其中浪费、不均匀、不合理的地方, 进而进行改善的方法, 是产品设计过程中评价产品设计正确性的主要步骤. 在对来自 CAD 软件的产品模型进行工程分析的工作中, 我们通常使用 CAE 软件(如: NASTRN, ANSYS 等)来确定产品的强度、应力等指标是否符合要求. CAE(Computer Aided Engineering)是用计算机辅助分析计算复杂工程和产品的力学性能以及优化结构设计等问题的一种近似数值分析方法. 其核心思想是将实际结构离散为有限数目的规则单元组合体, 实际结构的物理性能可以通过对离散体进行分析, 得出满足工程精度的近似结果来替代对实际结构的分析. 而离散分解过程中, 原有的三角网格的质量对离散的性能有很大影响, 从而对分析的结果产生影响.

有限元网格生成的研究有不少, 主要有两种方法, 即映射法和直接法^[1-4], 而这些方法或者说这些方法的衍生方法都是基于曲面参数方程. 在实际应用中, 出于对 CAD 模型保密性要求等诸多原因, 设计方一般不会将原始 CAD 模型直接交给第三方进行 CAE 分析, 代之以一种离散数据方式, 如网格模型方式, 将模型交出去. 当设计人员使用 CAD 软件完成产品设计后, 如果将模型导出为 OBJ、STL 等离散网格模型的数据, 则由于其曲面的参数信息丢失, 再想对这种模型进行二次三角化是非常困难的. 目前包括如 HyperMesh 等专业 CAE 前处理软件, 对导入其系统的网格模型基本上不提供重新三角化方法. 它们只针对原始 CAD 格式的模型(native format)或 B-Rep 格式的模型(x_t, sat)等, 可以进行三角化或其他形式的网格剖分. 针对这种情

① 基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(2007AA04Z1A5)

收稿时间:2012-02-28;收到修改稿时间:2012-04-08

况, 本文试图通过对三角网格模型的研究, 实现基于网格模型的直接二次三角化, 从而一定程度上突破目前 CAD/CAE 之间模型传递的这种限制。

1 系统概述

本文算法的主要步骤如下: 首先对 STL 数据文件的读取以及拓扑的修复和重建, 文献[5-7]中有详细叙述。接下来进行网格面片聚类, 即通过聚类, 将同类的三角面片聚集成为一个大区域; 第三步是网格重采样, 针对聚类后的大面片, 重新计算数据点, 尽量满足均匀性的要求。第四步是点云数据三角化。这方面的研究也已经比较多了, 详见文献[10-12]。

2 各模块的算法设计与实现

2.1 数据读取、拓扑建立及相关概念

有关于 STL ASCII 格式的介绍、STL 文件的读取和使用平衡二叉树删除 STL 中的冗余节点, 在文献[5-7]中有详细叙述, 其过程就是逐个读取数据并建立平衡二叉树。这里简单说明下本文所用到的片。

片是由若干三角面按一定规则组合的三维平面, 是本文算法的基本单元。由于本算法是把原对象分成若干片来分开做的, 那么所分开的每一片都有属于自己的边界边, 且片与片之间会有重合的边界边(方向属性不算), 因此在某一片上已经分好段的边界边, 在其它片上就不能再分一次了, 而分段数和网格重采样密度有关。

2.2 三角网格面片聚类

这一步的任务是将单个的三角形按照是否相邻以及法相量是否相同进行聚类, 为后面的两步做好准备。按照这样的规则聚类是为了在之后的均匀化中不破坏模型原有的形态。下图是聚类的效果:

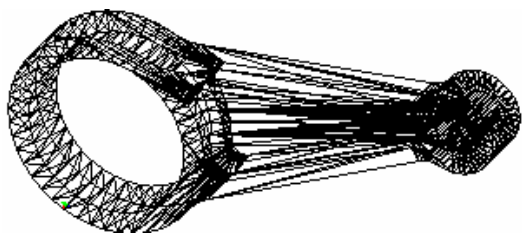


图 1(a) CAD 系统导出的连杆零件 STL 网格模型

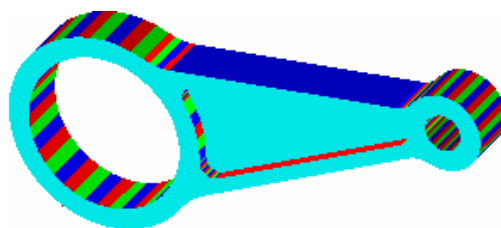


图 1(b) 连杆零件网格模型面片聚类

2.3 网格(面片)数据点重采样

这一步是本算法的核心, 一共分为八个步骤: 单片边界求取; 包围盒求取; 网格重采样模式选择; 网格重采样密度判断; 网格重采样初始化; 包围盒内网格重采样; 点的合法性判断; 边界上网格重采样。以上八个步骤分别对上一小节划分的每一片都做一遍。

2.3.1 单片边界求取

遍历所有半边, 并且将这些半边按照其包含的起点的顺序升序排列, 再将起点相同的那些半边按照终点的顺序升序排列, 并对具有相同起点的半边的位置和起点 ID 号做记录, 这样在寻找相邻半边的时候, 根据终点的 ID 号就可以轻松锁定其相邻半边的位置, 缩短寻找时间, 最后没有相邻半边的半边就是边界边。接下来就是把这些杂乱无序的边界边按照环的要求排序, 使它们变成真正意义上的边界。

2.3.2 包围盒求取

遍历片中所有的点, 求出其中在 x, y, z 轴上的最大值和最小值 $\max_x, \min_x, \max_y, \min_y, \max_z, \min_z$ 并做记录, 利用这六个值可以构造出一个长方体包围盒, 并且定义 x 轴上的最大和最小值的差为该包围盒的长 dis_x , y 轴上的最大和最小值的差为该包围盒的高 dis_y , z 轴上的最大和最小值的差为该包围盒的宽 dis_z 。

2.3.3 网格重采样模式选择

这一步其实是将当前面片投影到 xoy, yoz, xoz 坐标轴中的一个, 选择的标准是面积最大化。将当前面分别投影到 xoy, yoz, xoz 坐标轴中的一个, 选择投影面的面积最大的坐标轴来选择应该投影的位置。

2.3.4 网格重采样密度判断

网格重采样密度有全局密度和局部密度两种。全局密度 Density_all 由用户输入, 其含义为整个对象的包围盒的最长边的分段数, 参数为大于等于 1 的整数。

而局部密度 $Density_part$ 是局部对象的包围盒的最长边, 就是 dis_x 、 dis_y 、 dis_z 中的最大值)的分段数, 参数也为大于等于 1 的整数. 其与全局密度关系如下:

$Density_part = Density_all * Dismax_part / Dismax_all$.

2.3.5 网格重采样初始化

初始化包括起始点的确定和 x, y, z 三轴方向增加值 (add_x, add_y, add_z) 的确定. 起始点的坐标就是由 2.3.2 中所求得的 min_x, min_y, min_z 组成, 作为网格重采样的起点. 增加值和网格重采样模式有关, 以投影到 xoy 坐标为例:

$add_x = Dismax_part / Density_part$

$add_y = 0.866 * add_x // 31 / 2 / 2$

$row = \text{四舍五入取整}[(max_y - min_y) / add_y]$, 若为 0, 则其值以 1 论.

$add_y = (max_y - min_y) / row$;

xoy 坐标模式下, add_x 为首, add_y 为辅, add_z 不予理会, add_y 的选择主要是出于对正三角形网格的需求, 如果把 add_x 当成正三角形的边, 则 add_y 就是正三角形的高. 后面的三行公式是对 add_y 的修正, 主要目的是为了满足不同 $(max_y - min_y) / add_y$ 为整数, 其它投影模式类似.

2.3.6 包围盒内网格重采样

网格重采样也是和网格重采样模式密切相关的, 以 xoy 模式为例:

1. $point.x$ 累加 add_x ;

2. 判断($point.x$ 是否超过 max_x), 若是, 执行步骤 3, 不是, 步骤 5, 然后返回步骤 1 生成下一个点.

3. 若偶数行 $point.x = min_x$;

若奇数行 $point.x = min_x + add_x * 0.5$;

$point.y += add_y$;

4. 判断($point.y$ 是否超过 max_y) 若是, 结束, 不是, 步骤 5, 然后返回步骤 1 生成下一个点的坐标值.

5. $point.z = (D - A * point.x - B * point.y) / C$;

下一个点的 x 为前一个点的 $x + add_x$, 然后判断其是否大于等于 max_x , 若是, 该点的 x 按照行的奇偶性重新赋值, 奇偶行之间的交错是为了构成正三角形且该点的 $y + add_y$, 该点的 z 是通过当前片的平面方程 $Ax + By + Cz = D$ 求得的, 其它模式类似.

2.3.7 点的合法性判断

对于点的合法性, 主要是判断该点是否位于有效

区域内. 由于在 CAD 模型中边界是由一段一段的有向线段组成, 因此在这些边界段中找到离该点最近的那段有向线段, 然后通过向量法判断该点在该线段左边还是右边, 左边则合法, 右边反之.

2.3.8 面片边界重采样

由于上一步网格重采样是不管边界边的, 为了三角形分布的整体均匀, 边界也需要均匀重采样, 所谓边界重采样, 其实就是把原来的长边界割成大小均匀的小边界, 小边界的数量就是采样密度. 由于这是在线段上均匀重采样, 其基本思路就是先求出空间线段的包围盒, 再仿照 2.3.4 中局部密度的算法, 得到该线段的局部密度(小边界的数量), 然后确定起始点和 x, y, z 三轴方向增加值(add_x, add_y, add_z), 最后网格重采样以及重复点判断, 防止在同一条边界边上进行重复网格重采样, 算法简单, 因此就不详细说明了. 以下是网格重采样的效果图:

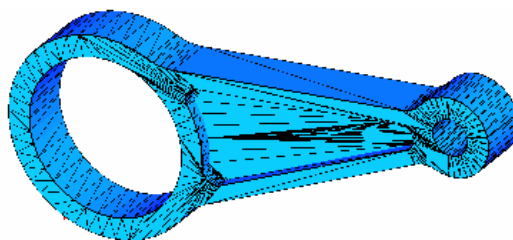


图 2(a) 连杆零件 STL 模型



图 2(b) 连杆零件 STL 模型中的数据点



图 2(c) 连杆零件网格重采样后点阵(采样密度 20)

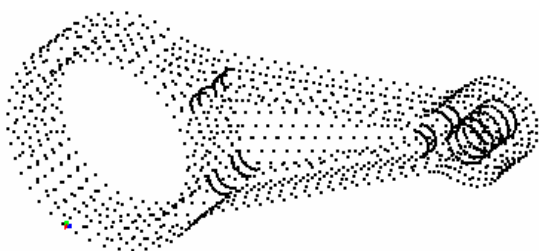


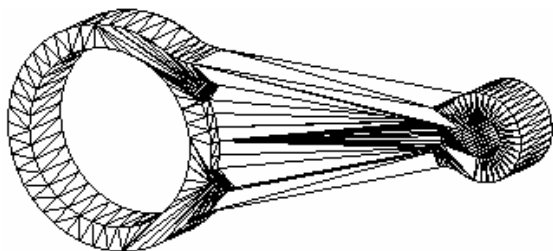
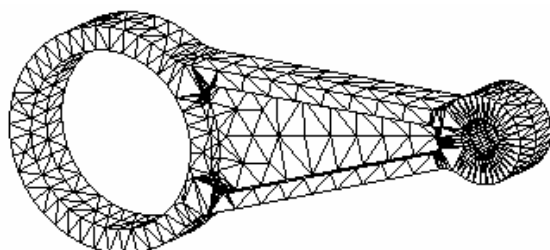
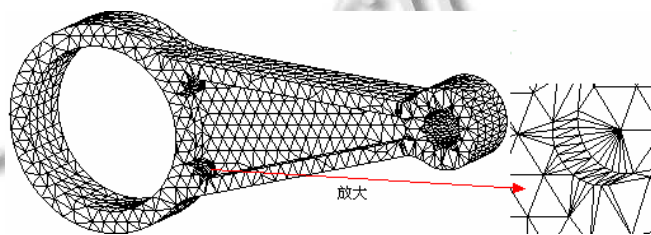
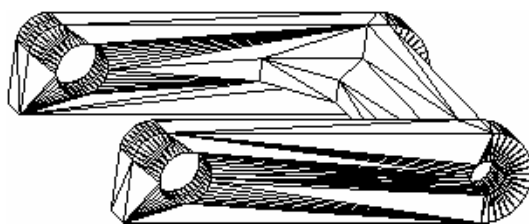
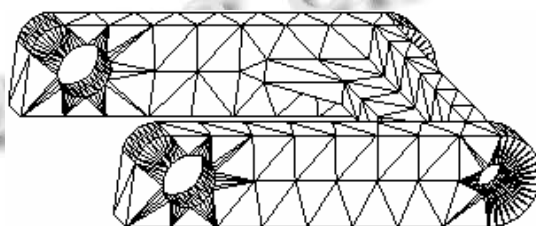
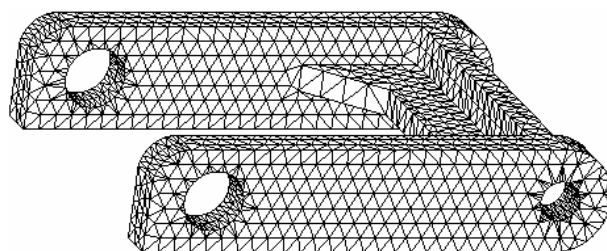
图 2(d) 连杆零件网格冲采样后点阵(采样密度 40)

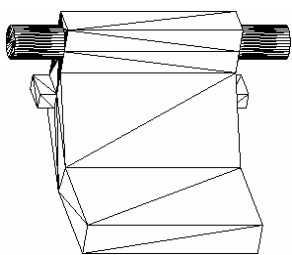
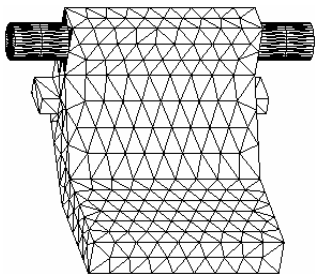
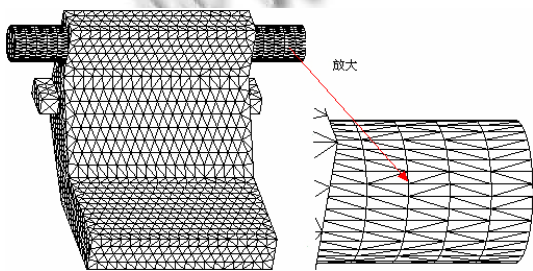
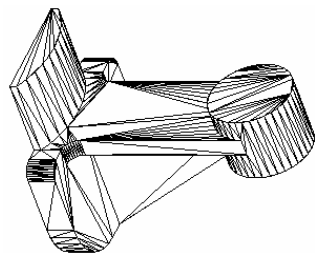
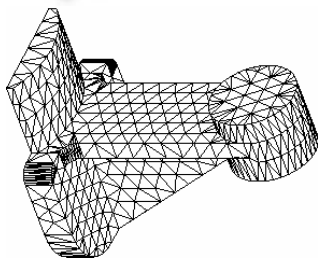
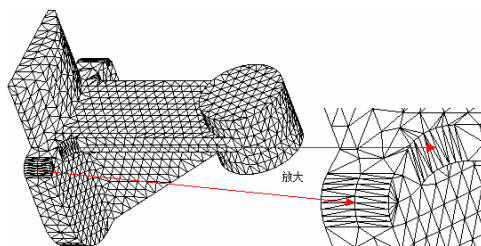
2.4 重采样数据点三角化

由于重采样是按照之前网格聚类结果进行的,因此三角化只需要对每一个聚类片包含的数据点进行即可。三角化算法很多,针对本文的特点,需要特殊处理的是各个聚类片边界上的点的三角化结果必须一致,否则最终重新生成的网格模型可能会出现缝隙等问题,这样的网格模型是不能用来进行 CAE 分析计算的。在文献[10-12]的基础上,我们重新写了三角化算法实现网格模型生成。本文采用 Lawson 算法,先构造一个大的三角形或多边形,再逐点插入并进行空外接圆检测和交换对角线来得到 Delaunay 三角网,然后再将 Lawson 算法产生的非法三角形删除,删除的方法是先求出三角形的几何中心,再通过 2.3.7 中的算法判断该点是否在合法区域内,以此判断当前三角形是否合法。

2.5 算法实现与结果分析

本文算法在 PC 机上借助 MFC 和 OPENGL 已经实现,以下是实验结果。在这里我们采用两个衡量三角网格均匀程度的参数:三角形最大长短比 $M1$ 和三角形平均长短比 $M2$ 。长短比是指一个三角形最长边和最短边的比值,最大长短比是指在所有三角形中长短比最大的值,平均长短比是指所有三角形长短比的平均值,利用最大长短比和平均长短比我们可以较客观的衡量三角形的形态优劣。

图 3(a) 控制臂零件 STL 模型 $M1=124$, $M2=9.9$ 图 3(b) 控制臂零件网格均匀化后采样密度:20,
 $M1=52$, $M2=4.2$ 图 3(c) 控制臂零件网格均匀化后 采样密度:40,
 $M1=52$, $M2=2.7$ 图 4(a) 连杆零件 STL 模型 $M1=119$, $M2=18$ 图 4(b) 连杆零件网格均匀化后 采样密度:10,
 $M1=16$, $M2=6.4$ 图 4(c) 连杆零件网格均匀化后 采样密度:30 $M1=18$,
 $M2=2.6$

图 5(a) 支撑物零件 STL 模型 $M1=21, M2=10$ 图 5(b) 支撑物零件网格均匀化后采样密度:15,
 $M1=17, M2=3.5$ 图 5(c) 支撑物零件网格均匀化后采样密度:30,
 $M1=19, M2=1.7$ 图 6(a) 支架零件 STL 模型 $M1=158, M2=8.2$ 图 6(b) 支架零件网格均匀化采样密度:15,
 $M1=58, M2=4.5$ 图 6(c) 支架零件网格均匀化采样密度:25,
 $M1=57, M2=3.2$

3 结语

本文提出了一种基于 STL 网格模型的有限元网格生成算法. 本文算法的重要性(创新性)体现在: 无需参数曲面信息, 即可完成对模型的二次三角网格剖分.

目前在 CAE 前处理领域, 网格剖分基本上都是针对 CAD 原始格式模型(native format)或用 B-Rep 表达的含有面片参数信息的模型进行. 因此作为产品设计一方, 必须要将包含完整形状参数信息的模型提供给第三方, 这对于设计者来说是有一定风险的. 通过对三角网格面片的聚类 and 重新采样, 我们实现了基于三角网格模型的网格二次均匀化, 使得三角形形态不好的 STL 模型成为更加符合 FEA 计算要求的形态良好的网格. 通过对采样密度的控制, 实现了网格密度和网格形态的调节可控. 接下来我们还要实现从三角网格模型直接生成形态均匀的四边网格模型, 进一步满足 FEA 计算的需求.

参考文献

- 1 关振群, 单菊林, 顾元宪. 基于黎曼度量的复杂参数曲面有限元网格生成方法. 计算机学报, 2006, 29(10): 1823-1832.
- 2 Gu CZ, Wu XY. A review of FEM and trend of development. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2008, 2(3): 248-259.
- 3 关振群, 宋超, 顾元宪, 隋晓峰. 有限元网格生成方法研究的新进展. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(1): 1-14.
- 4 黄晓东, 丁问司, 杜群. 基于波前法的参数曲面有限元网格生成算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(1): 51-59.
- 5 卫伟, 周来水, 张丽艳. 海量 STL 文件的快速读取与显示. 机械科学与技术, 2006(8): 935-975.
- 6 张必强, 邢渊, 阮雪榆. 面向网格简化的 STL 拓扑信息快速重建算法. 上海交通大学学报, 2004, 38(1): 39-42.
- 7 崔树标, 张宜生, 梁书云, 等. STL 面片中冗余顶点的快速滤

(下转第 104 页)