第32卷 第1期　　华侨大学学报(自然科学版)　　Vol. 32 No. 1
2011年1月　　Journal of Huaqiao University (Natural Science)　　Jan. 2011

文章编号： 1000-5013(2011)01-0001-04

一种实用的任意形状平面的三角封闭算法

刘晶峰，李洪友，蹇崇军

(华侨大学 机电及自动化学院，福建 泉州 362021)

摘要： 基于三维实体与剖切平面求交得到的任意形状平面，提出一种实用的三角封闭算法. 首先，确定环属性，将普通环划分为内环或外环；其次，将相关的内、外环合并为一系列填充区域；最后，利用前沿推进法实现填充区域的三角化. 大量算例表明，该算法简明、实用，且稳定可靠.

关键词： 剖切；平面；三角封闭；填充区域；环属性；三角化

中图分类号： TP 391.72　　**文献标识码：** A

在材料成型 CAD/CAE 领域，经常要处理所谓任意形状平面的封闭(或填充)问题，如 STL 实体分割[1]、网格剖分[2]等. 采用三角化网格技术可以实现任意形状截面的封闭，即三角封闭. 针对不同目标，三角封闭可分为两大类[3]：一种是利用截面顶点、边界和离散点实现截面三角化；另一种是只依靠截面顶点、边界完成截面三角形填充. 截面三角化一般要遵循三角形一致性原则和三角形匀称性原则. 20 世纪 70 年代以来，国内外不少学者对截面三角化进行了大量的研究，提出了诸如前沿推进法、Delannay 三角化法、正则向量法、几何分解法、单元映射法等[4]. 这些方法各有优缺点，从目前的网格生成算法的性能分析来衡量，在二维区域内前沿推进法具有较完全的自适应性和较高的时间效率(仅为 $O(N)$)[4]，而且程序健壮性好. 针对国内该研究中对环属性问题交待不具体的情况，本文给出了确定环属性的具体方法，并提出了一种实用的任意形状平面(截面)的三角封闭算法.

1 环属性的确定

1.1 环之间包含关系的判定

三维实体被截平面剖切后所得到的若干封闭多边形，还只能称为普通环，待其属性(包含关系及方向等)确定后才是真正意义上的环. 因此，任意形状平面三角封闭的初始化工作是将普通环转换为环，即确定环属性.

截面上的普通环，彼此之间只存在包含与被包含、不包含关系. 因此，要确定两个普通环 R_i 和 R_j 之间是否存在(被)包含关系，取某环上的任一个节点作为参考点，判定该点是否包含于另一环即可. 如取 R_i 环上的任一节点 P_k，若 P_k 在 R_j 内，则有 $R_i \subset R_j$；反之，$R_j \subset R_i$.

采用交点计数检验法[5]判断平面上一个点是否包含在一个环内. 其原理是：从判断点 $P(x_0, y_0)$ 作一条射线($x \geqslant x_0, y = y_0$)至无穷远；然后，求射线与环的交点个数. 若交点个数为奇数，则点在环内；否则，点在环外.

如图 1 所示，a，b 射线与环交于 2 点和 4 点，均为偶数，故判断 A，B 点在环外；而射线 c 与环交于 1 点，为奇数，所以 C 点在环内. 当射线 d 穿过环的某一个节点时，可采用摄动法使得射线 d 在 X 或 Y 方向上平移一段很小的距离，判断方法同上.

传统的交点计数检验法在射线穿过环的某一节点的特殊情况时，其采用的处理方法比较繁琐. 若共享顶点的两边在射线的同一侧，则交点计数加 2，否则加 1. 采用摄动法避免了判定射线与节点相交的

收稿日期： 2009-10-12

通信作者： 刘晶峰(1964-)，男，副教授，工学博士，主要从事材料成形 CAD/CAE 的研究. E-mail：ljf_027@163.com.

基金项目： 福建省科技计划重点项目(2008H0028)；华侨大学科研基金资助项目(07BS202)

情况,简化了计算并能准确地判断.

1.2 环方向的判定

环方向的判定基础是三角形方向的判定.一个有向三角形$\triangle P_1P_2P_3$中P_1,P_2,P_3按照其方向排列,如图2所示.

如果定义有向三角形逆时针方向时其面积为正,而顺时针时其面积为负,则由空间解析几何知识,下述关系成立,即

$$\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} = 2S_{\triangle}.$$

上式中:$S_{\triangle}$为有向三角形的面积,其正负与三角形方向一一对应.即面积为正值,对应的有向三角形方向为逆时针;而面积为负值,对应的有向三角形方向为顺时针.

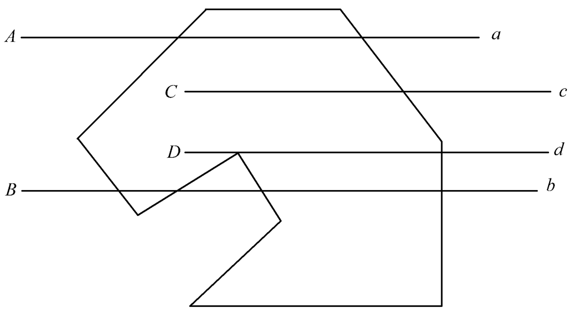


图1 判断点与环的位置关系

Fig.1 Determination on positional relation between a vertex and a ring

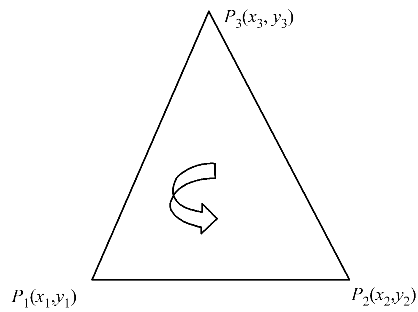


图2 三角形走向的判定

Fig.2 Determination on the direction of a triangle

选取环上的某3个节点构成一个三角形,由此三角形的方向可确定整个环的方向.如图2所示,假如环上的一个三角形$\triangle P_1P_2P_3$中P_1,P_2,P_3的序号依次递增,其方向为逆时针,那么整个环的方向也为逆时针;反之亦然.环的形状千差万别,边界有凸有凹,环上某3点组成的三角形的方向为逆时针,而另外3点组成的三角形可能为顺时针.因此,不能通过某一个三角形的方向来确定整个环的方向.

确定环的方向有如下两种方法:(1)极值点法.一个环通常有4个极点,即最上点、最下点、最左点和最右点,按序号选出其中某3个点组成一个三角形,此三角形的走向就是环的方向;(2)概率统计法.将环上顺序相邻的3个节点组成一个三角形$\triangle P_iP_{i+1}P_{i+2}$,确定此三角形的方向,分别统计出顺时针、逆时针方向的三角形个数.若顺时针个数比逆时针个数多,则整个环的方向为顺时针,反之亦然.极值点法简单、计算量小,而概率统计法得到的结果比较准确,但其计算量大、费时.因此,采用极值点法,而在一个普通环的极点少于3个时,才选用概率统计法.

1.3 内外环的确定

内外环的判定准则,如图3所示.如果一个普通环不包含于任何环或包含于偶数个环中,那么该环必为外环;而如果一个普通环包含于奇数个环中,那么该环一定是内环.

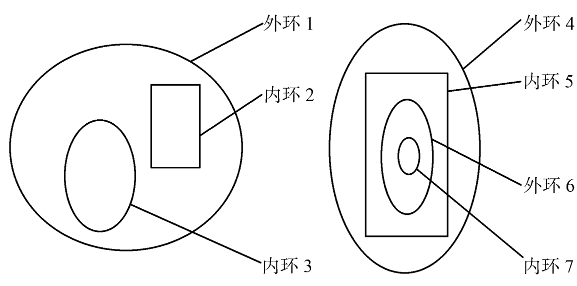


图3 内外环的确定

Fig.3 Determination on an inner/outer ring

2 填充区域的确定

一个外环如果是独立环,则其自身构成一个填充区域;而如果一个外环含有内环,则要将内、外环加以组合,形成一个填充区域.后一种填充区域的构成稍显复杂.

如果若干内环包含于一个外环,而这些内环彼此不存在包含关系,也不包含其他环,那么这些内环与对应的外环可以构成一个填充区域.图3中的外环1和内环2,3构成的填充区域即属于此种情形.

如果内环中还包含其他环,即存在环嵌套情况,此时可由外及里依次构成若干填充区域.外层填充区域形成后,可将相应的内外环贴上标记,以使其排除在内层填充区域之外.图3中的外环4与内环

5，外环 6 与内环 7 分别构成两个填充区域，就属于此种情形．

3　填充区域的三角封闭

填充区域的三角封闭算法有如下 5 个主要步骤．

（1）初始化．由边界点构成节点集合，而由边界边构成前沿队列．

（2）取前沿队列中的第 1 条边 V_1V_2，遍历所有的节点 V_j（$j=1,2,3,\cdots,N$，N 为节点数），找到节点集合 $V_x\in\{V_x \mid$ 三角形$\triangle V_1V_2V_x$ 的面积$>0\cap V_1V_x$ 和 V_2V_x 不与其他的边相交$\}$；然后，从 V_x 中选一个最佳节点 V_k，使得$\angle V_1V_kV_2$ 最大．$\triangle V_1V_2V_k$ 就是得到的一个最佳三角形，保存它．

（3）根据 V_k 与 V_1，V_2 的位置关系确定前沿队列的增减边操作：(a) V_k 与 V_1，V_2 均不相邻，删除 V_1V_2，增加 V_1V_k 和 V_kV_2，如图 4 所示；(b) V_k 与 V_1，V_2 之一相邻，删除 V_1V_2 和 V_2V_k，增加 V_1V_k，如图 5 所示；(c) V_k 与 V_1，V_2 都相邻，删除 V_1V_2，V_1V_k 和 V_kV_2，如图 6 所示．

（4）判断前沿队列是否为空，若成立，则进入步骤(5)；否则，跳到步骤(2)．

（5）输出所有的最佳三角形，形成三角形网格．

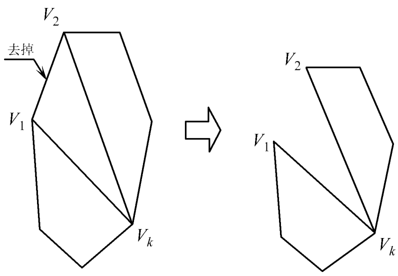


图 4　V_k 与 V_1，V_2 均不相邻

Fig. 4　Vertex V_k not adjacent to vertex V_1 and vertex V_2

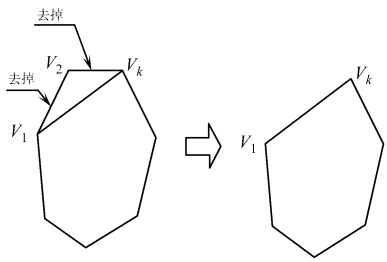


图 5　V_k 与 V_1，V_2 之一相邻

Fig. 5　Vertex V_k adjacent to either vertex V_1 or vertex V_2

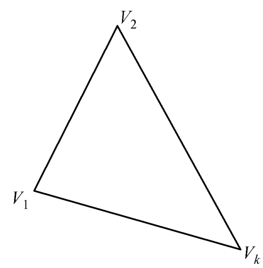


图 6　V_k 与 V_1，V_2 都相邻

Fig. 6　Vertex V_k adjacent to vertex V_1 and vertex V_2

4　三角化实例

利用具有面向对象技术的 Visual C++ 6.0 作为开发平台，编写相应的 C++ 程序可实现上述算法，同时，采用 OpenGL 绘图技术[6]输出三角化结果．图 7 为程序主界面，图 8，9 为两个三角化结果实例．图 8，9 中：半透明四边形代表剖切平面．

图 8 所示的截面由 3 个填充区域构成，其中有两个填充区域是由独立环形成的，而左边最大的填充区域则是由一个外环和 4 个内环构成的，整个截面含 584 个节点，三角封闭后输出的三角网格总数为 782 个．图 9 所示的截面只包括一个填充区域，由一个外环和两个内环构成，节点总数为 130 个，输出的三角面片总数为 137 个．

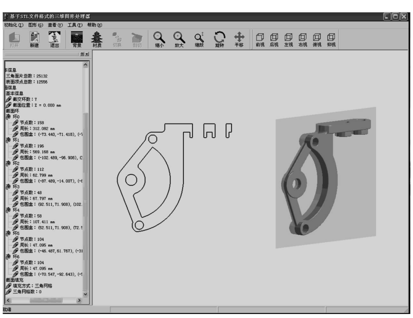
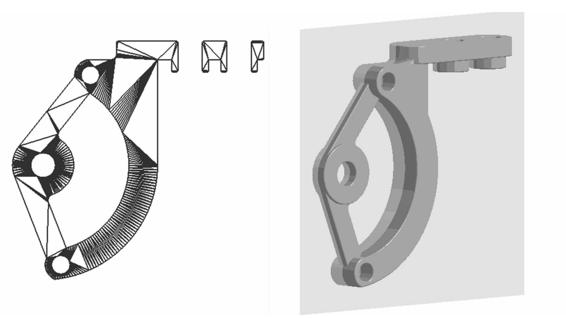


图 7　三角化程序主界面

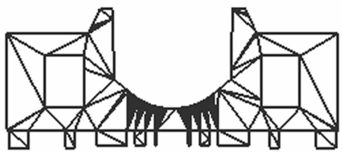
Fig. 7　Main interface of the triangulation program



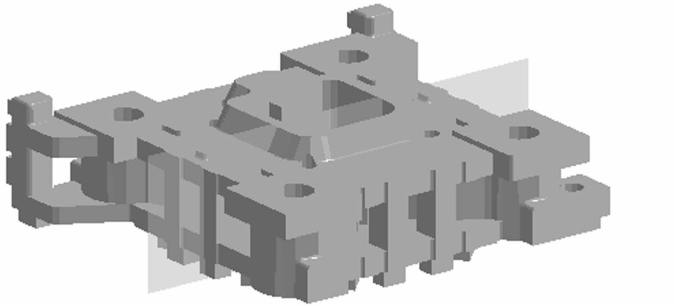
(a) 三角化输出结果　　(b) 三维实体模型视图

图 8　转速器盘三角化实例

Fig. 8　Triangular example of the panel of rotational speeder



(a) 三角化输出结果



(b) 三维实体模型视图

图9 定板三角化实例

Fig. 9 Triangular example of the fixity

5 结束语

针对三维实体剖切后得到的任意形状平面,提出一种十分实用的三角封闭算法. 该算法综合了环属性的确定、填充区域的确定和填充区域的三角封闭等关键技术. 算法采用面向对象编程技术实现,提高了程序的健壮性、可靠性和可扩展性. 大量三维铸/零件实体三角化结果显示,该算法简明实用、稳定可靠,特别适用于材料成形 CAD/CAE 领域.

参考文献:

[1] 黎步松,周钢,王从军,等. 基于STL文件格式的实体分割算法研究与实现[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2002,30(3):40-42.

[2] 刘晶峰,刘瑞祥,陈立亮,等. 铸造CAE系统前置处理模块中三维实体截面实时显示技术[J]. 铸造技术,2006,27(4):401-403.

[3] 李伟青,彭群生. 一个通用的快速三角化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(9):769-773.

[4] 李博,谢德馨,白保东. 二维任意平面三角形网格自动剖分的实现[J]. 沈阳工业大学学报,2002,24(3):196-199.

[5] 孙家广. 计算机图形学[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,1998:417.

[6] 孔令德. 计算机图形学基础教程:Visual C++ 版[M]. 北京:清华大学出版社,2008:210-224.

A Practical Triangular Close Algorithm for a Surface of an Arbitrary Shape

LIU Jing-feng, LI Hong-you, JIAN Cong-jun

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on the surface of an arbitrary shape, which is obtained by intersecting a 3D solid model with a clipping plane, a practical triangular close algorithm for it is introduced. Firstly, ring's attribute is determined to change a general ring into an inner/outer ring. Then, all inner or outer rings concerned are combined as a series of filling region. In the end, with the advancing front method, the triangulation of the filling region is accomplished. The application examples are given to prove that the algorithm is characteristic of simplicity, high practicality, stability and high reliability.

Keywords: clipping; surface; triangular close; filling region; ring's attribute; triangulation

(**责任编辑:** 陈志贤 **英文审校:** 郑亚青)