

文章编号: 1000-5013(2008)03-0327-04

铸造 CAE 系统的网格剖分技术

刘晶峰, 李洪友, 方建成

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 基于有限差分法和标准模板库(STL), 研究铸造计算机辅助工程(CAE)系统中的网格剖分关键技术, 具体包括 STL 实体截面轮廓快速生成、容错处理, 以及截面网格信息的快速提取等技术. 由于实现了容错处理技术, 对于既定的铸件/铸型系统, 其对应的 STL 数据文件即使存在一定的错误也可以顺利实施网格剖分, 这就充分保证网格剖分的安全性和稳定性. 特别地, 由于采用了较为简单的数据结构及简洁的算法, 所以确保网格剖分程序的高效率运行. 最后, 利用上述网格剖分技术成功实现三维铸件/铸型系统的网格剖分.

关键词: 网格剖分; 截面轮廓; 容错处理; 铸造 CAE; 有限差分法

中图分类号: TG 24; TH 164

文献标识码: A

铸造 CAE 系统一般由 3 个相对独立的模块组成, 即前处理模块、计算模块和后处理模块^[1-2]. 前处理模块是将三维几何原型通过一定的算法实现网格剖分, 为计算模块提供剖分文件数据接口. 对于基于有限差分法的铸造 CAE 系统来讲, 前处理模块的目的是获得铸件/铸型系统的有限差分网格单元(平行六面体网格单元). 铸件/铸型系统三维几何原型数据往往是以 STL 文件格式^[3]记录的, 这样的三维几何原型简称为 STL 实体. 因此, 前处理模块的中心工作就是对构成铸件/铸型系统的 STL 实体进行有限差分网格剖分. 目前, 采用切片法^[4]进行网格剖分较为实用. 本文研究了切片法中的 3 个关键技术, 包括 STL 实体截面轮廓快速生成、容错处理以及网格信息的快速提取等.

1 切片法原理

有限差分法(FDM)的网格单元多为正交六面体. 网格剖分的任务就是将铸件、铸型等目标对象的三维实体在 3 个坐标轴方向上分别剖切, 其结果将得到由众多小六面体“堆砌”而成的目标对象.

基于 STL 文件格式的网格剖分的第 1 步, 是将组成目标对象实体的所有三角形面片的顶点坐标读入内存. 假定 X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , Z_{\min} , Z_{\max} 分别为剖分实体在 3 个坐标轴方向的最小值及最大值, 并且 dx , dy , dz 分别代表沿 3 个坐标轴方向的剖分步长. 首先, 在 Z 轴方向上, 剖分平面从 $Z_0 = Z_{\min}$ 开始到 $Z_N = Z_{\max}$ 结束, 其中 $Z = (Z_{\max} - Z_{\min})/dz$ 是 Z 方向的网格数. 如果剖分到 Z 方向第 K 层($0 < K < N$), 此时的截面方程显然为 $Z_k = Z_{\min} + (K - 1) \times dz$. 判断所有组成实体的小三角形面片与 Z_k 截面相交的可能性, 并求出与 Z_k 截面相交的交线, 由此可以得到 Z_k 截面上的封闭二维剖面环. 然后, 在 Z_k 平面上对 Y 轴方向进行剖分, 剖分从 $Y_0 = Y_{\min}$ 开始到 $Y_M = Y_{\max}$ 结束, 其中, $M = (Y_{\max} - Y_{\min})/dy$ 是 Y 轴方向的网格数.

如果剖分到 Y 方向第 J 层($0 < J < M$), 此时的截面方程为 $Y_J = Y_{\min} + (J - 1) \times dy$, 判断所有前述的封闭二维剖面环与 Y_J 相交的可能性, 求出与 Y_J 截面相交的交点. 对所有交点以 X 坐标值由小到大进行排序, 可以得到一系列进出点. 然后, 在 X 轴方向上, 从 $X_0 = X_{\min}$ 开始到 $X_P = X_{\max}$ 结束, 其中 $P = (X_{\max} - X_{\min})/dx$ 是 X 方向的网格数. 判断点 $[X_1 = X_{\min} + (I - 1) \times dx, Y_J, Z_k]$ 是否在上述进出点之间

收稿日期: 2007-11-24

作者简介: 刘晶峰(1964), 男, 讲师, 工学博士, 主要从事材料成形 CAD/CAE、计算机图形学的研究. E-mail: ljf_027@163.com.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2006J0166); 华侨大学科研启动基金资助项目(07BS202).

(其中 $0 < I < P$), 从而确定该点是否在目标对象的内部. 上述 3 重循环结束后, 将三维实体目标对象剖分成数值模拟计算所需的 FDM 网格单元.

2 关键技术

设铸件/铸型系统最大的轮廓点 $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ 和点 $(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ 形成的六面体, 总网格数为 $n_x, y, z = n_x \times n_y \times n_z$. 其中, n_x, n_y, n_z 分别为 X, Y, Z 方向的网格数, $\delta x_i, \delta y_j, \delta z_k$ 是单元 $e_{(i,j,k)}$ 3 个方向上的网格尺寸. $e_{(i,j,k)}$ 单元的中心空间坐标可以由

$$\left. \begin{aligned} x_{e_{(i,j,k)}} &= x_{\min} + \sum_{l=1}^{i-1} \delta x_l + \delta x_i/2, \\ y_{e_{(i,j,k)}} &= y_{\min} + \sum_{n=1}^{j-1} \delta y_n + \delta y_j/2, \\ z_{e_{(i,j,k)}} &= z_{\min} + \sum_{m=1}^{k-1} \delta z_m + \delta z_k/2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

求得, 且网格尺寸满足

$$\left. \begin{aligned} x_{\max} - x_{\min} &= \sum_{l=1}^{n_x} \delta x_l, \\ y_{\max} - y_{\min} &= \sum_{n=1}^{n_y} \delta y_n, \\ z_{\max} - z_{\min} &= \sum_{m=1}^{n_z} \delta z_m. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

图 1 是采用切片法获得(非)均匀网格的流程图. 切片法的核心是用平行某一坐标平面如 XY 平面(即垂直于 Z 轴)的一簇平面 $z_{e_{(i,j,k)}}$ ($k = 1, 2, 3, \dots, n_z$) 来“剖切”铸件, 从而获得铸件每层的截面轮廓, 再根据截面信息来获得每层的网格信息. 其关键的技术有两点: 一是快速获得截面轮廓信息, 即获得“剖切”面和三角形小平面的交线; 二是对截面轮廓信息进行处理, 获得该层网格信息.

2.1 STL 实体截面轮廓快速生成

当 $z_{P_m} < z_{e_{(i,j,k)}} < z_{P_n}$ 或者 $z_{P_m} > z_{e_{(i,j,k)}} > z_{P_n}$ 时, 其中 $m = 1, n = 2$, 或 $m = 1, n = 3$, 或 $m = 2, n = 3$; $l = 4$, 或 $l = 5$, 如图 2 所示. 通过

$$\left. \begin{aligned} x_{P_l} &= x_{P_n} + \frac{x_{P_m} - x_{P_n}}{z_{P_m} - z_{P_n}} (z_{e_{(i,j,k)}} - z_{P_n}), \\ y_{P_l} &= y_{P_n} + \frac{y_{P_m} - y_{P_n}}{z_{P_m} - z_{P_n}} (z_{e_{(i,j,k)}} - z_{P_n}), \\ z_{P_l} &= z_{e_{(i,j,k)}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

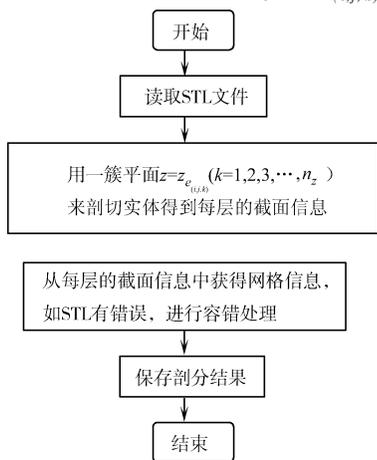


图 1 用切片法获得(非)均匀网格的流程图
Fig. 1 Flow chart of even/ uneven mesh generation based on slice method

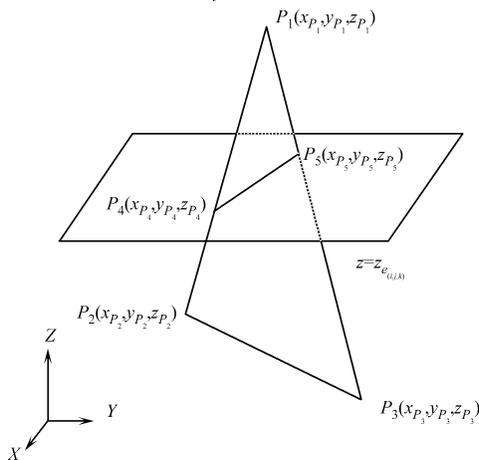


图 2 求剖切面与三角形小平面的交线
Fig. 2 Evaluating intersecting line between an intersecting plane and a triangle facet

可以求出“剖切”面和三角形小平面的交线即两个交点 P_4, P_5 的坐标值. 有两个特例: 其一是当剖切面经过三角形小平面的一条边时, 则视为对应的两个顶点为交点; 另一个是当剖切面只经过三角形小平面的 1 个顶点时, 则该交点为奇异点, 将剔除该点(相当于视该三角形小平面和剖切面无交线). 遍历所有三角形小平面并求交后就得到截面轮廓.

2.2 截面网格信息的快速提取

按上述方法所获得的截面信息是由许多交线段组成的一个或几个多边形, 由这些截面轮廓即可获得相应单元信息, 如图 3 所示. 具体的方法是先由

$$\left. \begin{aligned} x_{P_l} &= x_{P_n} + \frac{x_{P_m} - x_{P_n}}{y_{P_m} - y_{P_n}}(y_{e(i,j,k)} - y_{P_n}), \\ y_{P_l} &= y_{e(i,j,k)}, \\ z_{P_l} &= z_{e(i,j,k)}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

求得单元中心点在某一方向上的连线(扫描线)和轮廓线的交点, 进行配对后得到单元信息. 首先, 求扫描线(与 X 轴平行)与截面轮廓线的交点, 通常情况下得到 1 个元素个数为偶数的交点数组; 其次, 交点数组元素按 X 轴坐标值递增排序; 再次, 将交点数组元素配对, 法则是第 1 个与第 2 个, 第 3 个与第 4 个, ……依次配对, 得到一系列配对交线; 最后, 沿 X 轴方向逐层配对交线扫描, 便可获得截面网格单元信息.

2.3 容错处理

容错处理是网格剖分的一个重要方面, 采用切片法获得了截面的轮廓, 图 3 是 z 方向上某一截面信息, 再用射线扫描法来获得该层的单元信息. 在这个过程中, 常常要进行容错处理, 因为输出 STL 文件时常常有错误, 得到的截面信息往往不完整, 其轮廓线不封闭.

一般来说, 可采取避开的策略来实现网格的正确剖分, 也就是当射线 $y = y_{e(i,j,k)}$ ($y_{\min} \leq y$), $z = z_{e(i,j,k)}$ 落在轮廓线不封闭的区域(图 3 中的虚线为轮廓不封闭区域)或与轮廓线相切时, y 偏离 $y_{e(i,j,k)}$ 一定的距离 y_{error} , 以避免不封闭区域或避免与轮廓线相切(图 3). 设 Δy

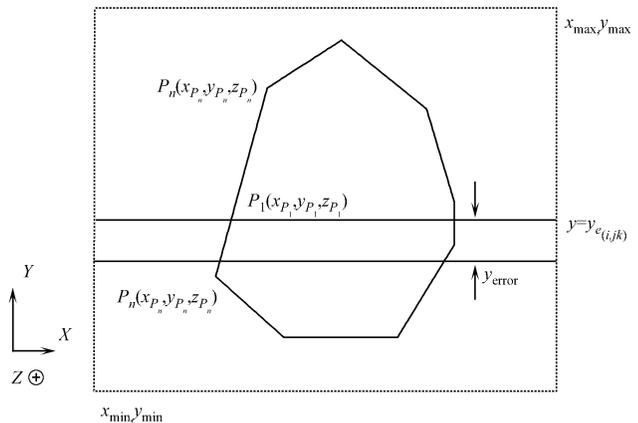


图 3 切片法所获得的截面信息及容错处理

Fig. 3 Cross section information based on slice method and coping with error tolerance

为容错步长, k 为容错次数, 当射线穿过不封闭区域时, y 的值可以由

$$y = y_{e(i,j,k)} + y_{\text{error}} = y_{\min} + \sum_{n=1}^{j-1} \delta y_n + \delta y_j / 2 + \Delta y \cdot k, \quad (5)$$

$$y = y_{e(i,j,k)} - y_{\text{error}} = y_{\min} + \sum_{n=1}^{j-1} \delta y_n + \delta y_j / 2 - \Delta y \cdot k \quad (6)$$

求得. 需要指出的是, 正是由于采用了容错处理技术, 对于那些 STL 数据文件存在一定错误的铸件/铸型系统. 这些错误主要是通过三位造型软件按 STL 格式输出三维模型数据时产生的, 诸如三角形面片数据违反了右手法则、顶点法则和边法则等. 只要不是十分严重的造型错误, 一般都可以顺利实施网络剖分. 这样极大地提高了网格剖分的安全性和稳定性, 同时也保证了网格剖分的高效率.

3 实例

以 VC++ 6.0 为平台开发了铸造 CAE 系统的前处理模块, 利用上述网格剖分技术成功实现了对铸件/铸型系统的三维网格剖分. 图 4 为从动座铸件/铸型系统网格剖分实例, 该系统最大外形轮廓尺寸为 $1\,998\text{ mm} \times 1\,593\text{ mm} \times 1\,998\text{ mm}$, 采用均匀网格剖分, 各向网格步长满足 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 13.5\text{ mm}$. 因此, 总网格数为 2 584 672, 其中铸件网格数为 382 705, 整个剖分过程非常快捷. 在一般的 PIV 256 MB 内存的 PC 机上耗时不足 5 min. 图 4(a) 为 STL 实体模型, 其显示是基于 OpenGL 技术^[5]实现的; 图 4

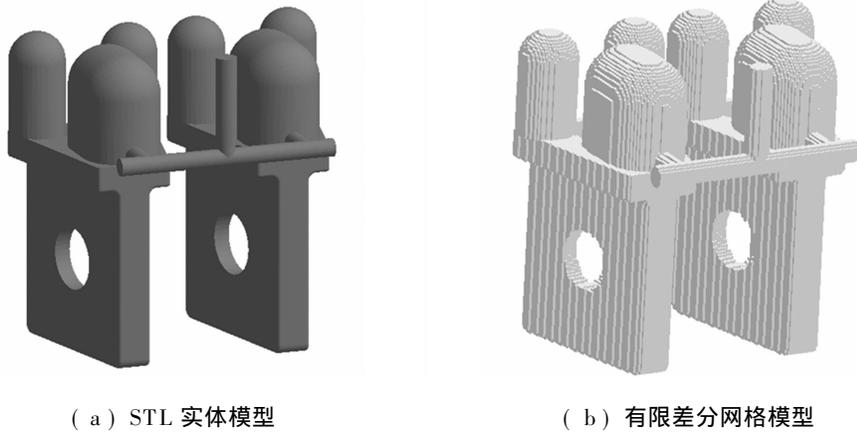


图4 网格剖分实例

Fig. 4 An instance for mesh generation

(b) 为有限差分网格模型, 是基于设备无关位图(Device-Independent Bitmap, DIB) 绘图技术^[6]实现的。

4 结束语

本文研究了铸造 CAE 系统中的网格剖分关键技术。上述的截面轮廓生成、容错处理以及截面网格信息提取等技术, 算法简捷, 不需复杂的排序和查找, 也无需深度递归调用。由于算法简单, 实现上述技术比较容易, 特别是不需复杂的数据结构, 仅用一般的数组即可。由于实现了容错处理技术, 极大地提高了网格剖分的安全性和稳定性。

参考文献:

- [1] 孙 逊, 安阁英, 王君卿, 等. 铸件充型凝固过程数值模拟发展现状[J]. 铸造, 2000, 49(2): 84-88.
- [2] 王 军. 铸件凝固过程数值模拟前处理的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.
- [3] 郭九生, 梁正和, 洪 军, 等. 快速成形制造中几何模型和数据模型的处理技术[J]. 材料科学与技术, 1998, 17(1): 88-90.
- [4] 陈立亮, 刘瑞祥, 林汉同. 基于 STL 网格剖分技术的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1999(1): 145-147.
- [5] 贾志刚. 精通 OpenGL[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [6] 刘晶峰, 刘瑞祥, 陈立亮, 等. 铸造 CAE 系统后置处理模块中的 DIB 绘图技术[J]. 铸造, 2004, 53(1): 52-53, 56.

Study on Technique of Mesh Generation in Foundry CAE System

LIU Jing-feng, LI Hong-you, FANG Jiar-cheng

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

Abstract: Based on finite difference method (FDM) and stereolithography (STL) file schema, the key techniques of mesh generation in foundry computer aided engineering (CAE) system have been studied, including the technique for fast generating outlines of cross section, the technique for handling error tolerance and the technique for rapidly generating mesh from cross section. Because of the realization of the technique of error tolerance handling, mesh generating from the system of casting/mold may be smoothly carried out, even if some errors (not too serious) exist in its STL data file, making the process of mesh generation more secure and steady. Particularly, with simple data structure and simple algorithm, the program of mesh generation has been efficiently running. Finally, based on the key techniques mentioned above, mesh generating from the three dimensional casting/mold system has been successfully implemented.

Keywords: mesh generation; cross section outline; error tolerance handling; foundry CAE; finite difference method

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)