

DOI: 10.3901/JME.2008.09.205

基于网格边拓扑的曲面法向规一化算法*

刘瑞军^{1,2} 胡平³ 宋玉泉¹ 郭威¹

- (1. 吉林大学材料科学与工程学院 长春 130025;
2. 北华大学交通建筑工程学院 吉林 132013;
3. 大连理工大学汽车工程学院 大连 116024)

摘要: 提出基于曲面网格重构拓扑关系的自动翻法线算法, 该算法的设计思想源于 ACIS 曲面缝合和拓扑重构中有向边的概念, 通过调整相邻单元公共边的节点, 使相邻单元公共边所属的有向边方向相反, 实现曲面单元法向快速、准确一致化。通过对表面上的裂纹、孤立单元、孤立单元群和重叠单元等缺陷进行有效处理, 具有很好的适应性。这种算法能够准确完成冲压工具单元法向的一致操作, 可为后续板料成形数值模拟中的接触算法提供前提条件。应用算法对复杂汽车覆盖件进行自动翻法线操作, 结果验证了算法的有效性。

关键词: 曲面 拓扑重构 有向边 翻法线

中图分类号: TG386

Normal Consistent Arithmetic of Surface Based on Topology of Grid Edge

LIU Ruijun^{1,2} HU Ping³ SONG Yuquan¹ GUO Wei¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025;
2. College of Transportation and Civil Engineering, Beihua University, Jilin 132013;
3. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: The algorithm of automatically reversing normal which is based on topology after surface mesh repairing is presented. This algorithm of automatically reversing normal comes from the concept of coedge during ACIS's surface healing and topology repairing is proposed. This algorithm can rapidly and accurately achieve the consistency of surface element normals by adjusting nodes of common edges of neighboring elements to make the two coedges belonging to the same common edge have the opposite directions. This algorithm has good adaptability by effectively dealing with faults such as crack between elements, isolated element(s) and element group(s), overlap element(s). This algorithm can accurately achieve consistency mesh normal of punch tools and provide necessary precondition for the follow contact algorithm before numerical simulation technology of sheet forming process. The validity is confirmed by results which the complex automobile panels normal are automatically reversed.

Key words: Surface Repairing topology Coedge Reverse normal

0 前言

汽车覆盖件成形模面复杂, 为了保证基于网格的等距算法结果正确, 要求被等距的网格法线应该是一致的。因此, 须要设计出正确、高效的自动翻法线算法, 以此来保证接触算法的实现^[1]。

目前自动翻法线的算法——种子单元法是基于独立网格单元来进行翻法线操作, 但对于 CAD 零

件曲面片间存在裂缝、重叠的情况, 原来的算法可能出现单元法向不一致的问题。后来有学者改进了种子单元法, 利用 CAD 零件的曲面片信息, 改进了零件曲面片间存在裂缝、重叠时导致的法线不一致的问题^[2], 但是种子单元法仍存在以下缺点。

(1) 必须首先确定正确的冲压方向。在网格法向没有一致化之前, 如果得到的冲压方向值不准确, 则容易增加后续的查找次数, 增加计算时间。如果得到的冲压方向矢量值为(0,0,0), 就得不到第一批种子点, 虽然这种情况不多见, 但是对于完全对称的零件是可能存在的, 最终会形成死循环。

* 国家杰出青年科学基金项目(10125208)、国家汽车电子产业化重大专项(2004-2563)和吉林大学“985工程”汽车工程科技创新平台项目的联合资助。20071008收到初稿, 20080425收到修改稿

(2) 计算的精度和效率受事先设定的判断值 λ ^[3](单元的法向矢量与冲压方向之间夹角 α 的 $\cos \alpha > \lambda$ 时, 认为此单元的法线方向与冲压方向一致; 反之认为该单元的法线方向与冲压方向不一致) 的影响。由于曲面网格十分复杂, 对于不同的网格, λ 的大小对结果的影响程度也不相同, 程序设计人员很难给出一个合适的 λ 值。

(3) 根据相邻单元的法向夹角来判断单元法向是否一致。这种判断条件可能会导致零件“尖角”处同一表面的相邻单元法向不一致的误判, 存在一定的缺陷。

(4) 当一个节点的相邻单元都不是种子单元时, 自动对下一个单元进行判断。这就意味着算法在大部分的情况下, 要进行多次循环, 降低了计算效率。

针对种子单元法存在的缺陷, 本文提出了新的曲面单元法向规一化算法——基于网格边拓扑的曲面法向规一化算法, 即利用 ACIS 曲面缝合和拓扑重构产生的单元的边界信息, 实现曲面单元法线的自动规一。

1 ACIS 的基本知识

ACIS 是一个精确的几何造型器, 用一些由内部关联的曲线和曲面组成的网络来描述形状, 称之为边界表示法。边界表示法明确地定义曲线或曲面的边界: ① 曲线的边界由位于曲线上的一对点来确定。② 曲面的边界由位于曲面上的一组曲线来确定。

为了区分有边界的面和没有边界的面, ACIS 采用以下定义: ① 曲面的连通域称为面。② 曲线的连通域称为边。③ 边的边界上的点(也就是端点)称为顶点^[4]。

拓扑的严格性遵循 Mobius 定律, Mobius 定律认为两个面的共享边是一个双向实体, 也就是说边不仅界定表面而且具有连接表面的拓扑功能。

ACIS 采用翼边结构和裂边结构共同派生的方案, 这种方案的特点是对边的方向功能和表示连接信息的拓扑功能分别进行处理。

边的方向功能由有向边表示, 有向边来源于 ACIS 曲面缝合的拓扑重构。环是面的边界中互相连接的公共边集合, 该集合中的公共边可以是首尾连接而形成一个封闭环, 也可以在某个端点不连接而形成开环。有向边记录的是边在环中出现的

情况, 引入这个概念就允许一条边可以在一个、两个和更多面中出现。环中的有向边是有方向的, 有向边的方向和面单元法向遵循右手螺旋规则。例如三角形单元的边、有向边、单元法向的关系, 如图 1 所示。

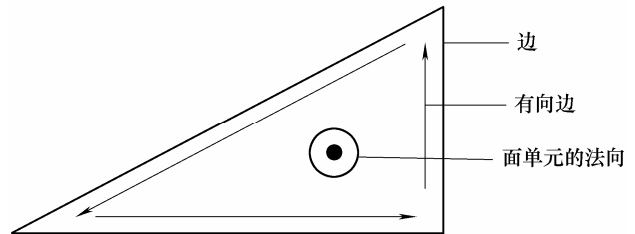


图 1 三角形单元的边、有向边、单元法向的关系图

2 曲面法向规一算法描述

2.1 算法思想

ACIS 曲面缝合是通过网格单元构建一个单向网格曲面的过程。将网格中的三角形单元视为一个小平面, 四边形单元视为一个小曲面。每个单元的边界视为一个封闭环, 组成环的每一条边都是有向边, 有向边的正方向为边的起点指向终点。算法通过调整曲面上网格单元节点的顺序, 就可以改变有向边的方向, 使相邻单元共边的有向边方向相反, 实现曲面上相邻单元的法向一致。对每一个曲面单元进行判断、调整, 实现曲面上所有网格单元的法向规一, 如图 2 所示。

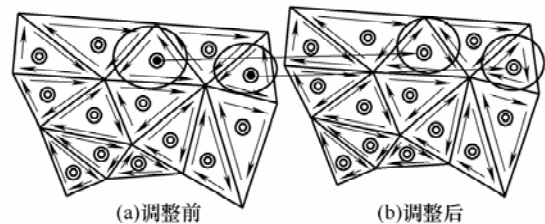


图 2 网格单元的法向规一图

2.2 获取网格信息

导入 IGES 文件, 缝合成为一个单向曲面, 提取曲面上单元边及边的端点对应的节点号信息。

网格单元边由边的两个端点节点号决定, 为了提高边的搜索效率, 引进了大小边的概念。设两条边的节点号分别为 $\langle x_1, y_1 \rangle$ 、 $\langle x_2, y_2 \rangle$ (节点号为非负整数)。比较边的两个节点号乘积, 乘积大的则表示边大, 如果乘积相等, 再比较边的两节点号之和, 和大则边大, 和相等则边相等。边相等的判断条件为

$$x_1 y_1 = x_2 y_2 \parallel x_1 + y_1 = x_2 + y_2 \quad x_1, y_1, x_2, y_2 \geq 0$$

根据大小边规则将每个单元的边存储到所属单元的容器中备用。

2.3 选取初始单元

在所有零件网格中任取一个单元，根据边相等条件判断与该单元共边单元的个数，如果共边单元的个数小于 2，说明此单元为孤立单元，将其删除。按照上面的判断准则，删除所有的孤立单元。在完成孤立单元删除操作的网格中任取一个单元作为初始单元，这样既防止把一个孤立的单元选为初始单元，造成曲面上其他单元的法向与孤立单元的法向一致的重大错误，又清理了孤立单元，提高了算法的准确性和效率。

在网格质量比较差的情况下，曲面网格中会出现孤立单元群。考虑到曲面网格中合格网格的数量远远大于孤立单元群的数量，算法通过比较已经进行过法向翻转判断的单元数量容器(N_1)和未进行法向翻转判断的单元数量容器(N_2)的大小来处理孤立单元群。

(1) 如果 $N_1 < N_2$ ，说明选取的初始单元存在于局部孤立单元群中(这种情况出现的概率很小)，删掉已经进行法向翻转判断的单元，从没有进行法向翻转判断的单元中选取符合初始单元条件的单元作为初始单元，重新对曲面单元法向进行翻转判断。

(2) 如果 $N_2 < N_1$ ，说明选取的初始单元存在于合格的单元群中，保留已经进行法向翻转判断的结果，删除未进行法向翻转判断的单元。

(3) 如果 $N_1 = N_2$ ，说明曲面网格质量完好，没有孤立单元群的情况。

删除孤立单元和孤立单元群的结果，如图 3 所示。

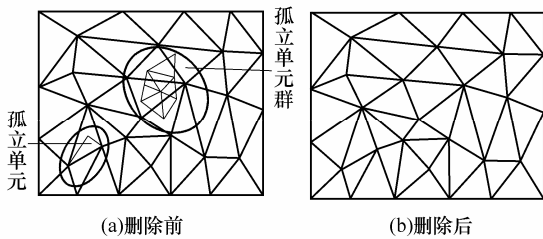


图 3 删除孤立单元与孤立单元群的结果图

2.4 网格单元法向翻转

为了方便表示，使用 N_i^j 形式来说明网格单元查找扩散过程。下角标 i 表示初始单元的级数，上角标 j 表示与初始单元共边的单元的序列号。例如， N_1^1 为第一级的初始单元， N_2^1 、 N_2^2 、 N_2^3 为与三角形单元 N_1^1 共边的单元，也是第二级的初始单元，然后根据边相等原则查找下级的所有单元。遍历网格

单元的过程，如图 4 所示。

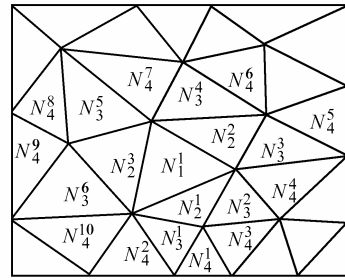


图 4 遍历网格单元的过程图

通过判断下级单元的有向边与初始单元的有向边的方向，来确定此单元的法向是否与初始单元的法向一致。如果有向边的方向一致，则说明法线方向相反，就要进行法向翻转；如果有向边的方向不一致，则说明法线方向相同，不须进行翻转。通过调整单元节点的方法实现单元法向的翻转，根据单元形式不同须采用不同的调整方法：① 对于三角形单元，将该单元的第二个节点与第三个节点进行对换。② 对于四边形单元，将该单元的第二个节点与第四个节点进行对换。

为了防止重复判断影响效率，对完成法向翻转的单元进行标记。如此进行法向判断、翻转的操作，直到未标记的单元的个数为零，即法向规一化完成。

2.5 曲面法向规一化检查

如果导入的网格数据有单元重合的情况，须要通过单元所有的边都相等为判断条件找到重合单元组，保留重合单元组中的任意一个单元，删除与其重合的其他单元即可。根据网格单元法向翻转规则对保留下的单元进行法向规一操作。

另外，曲面网格间可能会存在微小裂纹，只要裂纹边缘的网格不符合孤立单元的条件，就不影响对此类单元的翻转。如果裂纹较大，则须要进行缝合处理，然后再进行法向翻转。

所有曲面单元的法向经过判断、翻转后都与初始单元的法向一致，如果曲面单元的法向与所要求的方向相反，只须将所有单元法线方向统一进行翻转即可符合要求。

3 应用举例

选取某汽车翼子板、前地板复杂零件验证算法效果，经过规一化处理，所有单元的法线方向均准确指向外部，如图 5、6 所示。实际模拟过程中，算法可以通过设置初始单元法线方向的对话框，实现

零件或工具法向的不同要求(与冲压方向相同或相反),这为后续有限元程序中的接触算法提供了重要的保障。

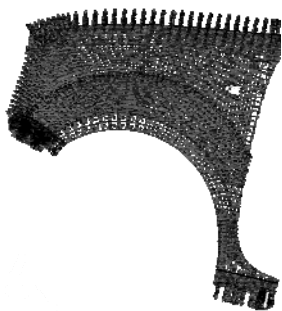


图 5 翼子板法向规一化效果图

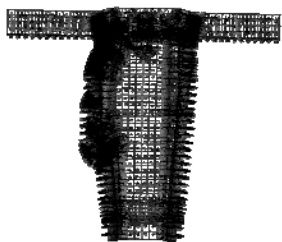


图 6 车内前地板法向规一化效果图

4 结论

(1) 采用组建拓扑关系的思想,能有效解决曲面网格中的孤立单元、孤立单元群、网格裂纹和网格重叠等问题。不须事先确定冲压方向和 λ 值,利用零件本身的拓扑信息就能够完成单元法线方向的规一。

(2) 通过设定初始单元法线方向,实现曲面所有单元法线方向与设定方向一致的操作,为后续的等距算法和接触算法提供前提条件。

(3) 采用边大小的概念,提高了存储和遍历的效率。实际操作中,翻法线的准确性过于依赖曲面的缝合质量。

(4) 如果存在缝合间隙较大的情况,算法易将

缝合处的正常单元判断为孤立单元或孤立单元群处理。为准确实现翻法线操作,应提高 CAD 零件曲面间的缝合质量。

参 考 文 献

- [1] 鲍益东, 那景新, 胡平. 汽车覆盖件成形模面快速等距算法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 166-169.
BAO Yidong, NA Jingxin, HU Ping. Fast offset algorithm of auto-panel forming surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 166-169.
- [2] 朗志奎, 胡平, 赵玉谦, 等. 一种改进的自动翻法线算法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 142-144.
LANG Zhikui, HU Ping, ZHAO Yuqian, et al. Improved automatic reverse normal arithmetic[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 142-144.
- [3] 孙家广, 杨长贵. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
SUN Jianguang, YANG Changgui. Computer graphics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [4] 詹海生, 李广鑫, 马志欣. 基于 ACIS 的几何造型技术与系统开发[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
ZHAN Haisheng, LI Guangxin, MA Zhixin. Based on ACIS geometric modeling technology and system development[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

作者简介: 刘瑞军, 男, 1973 年出生, 博士研究生。主要研究方向为汽车覆盖件成形与模面工程。

E-mail: tjuliuruijun@163.com

胡平(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车身虚拟设计与制造工程。

E-mail: pinghu@dlut.edu.cn

宋玉泉, 男, 1933 年出生, 教授, 院士, 博士研究生导师。主要研究方向为超塑性与塑性理论及现代精密成形。

E-mail: syq@jlu.edu.cn