

8-7-2020

Calculation of Vessel's Geometric Properties Based on STL Model

Chunlei Liu

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Yin Yong

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Xiaofeng Sun

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Xiufeng Zhang

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Calculation of Vessel's Geometric Properties Based on STL Model

Abstract

Abstract: To improve the accuracy of the ship geometric properties calculation and the real-performance of the program, a method based on STL triangular mesh model was proposed to calculate the ship geometric properties. *SH polygon clipping algorithm in computer graphics was used to calculate the intersection of ship and water plane. By using of coordinates systems affine transformation, 3D water plane was changed to 2D plane to extract the profile contour. Because the waterlines are monotone polygon, Mass center insertion method was proposed to finish polygon triangulation, computing speed was improved.* Bulk carrier "Taihang 128" was taken as an example, comparing the calculated results with the data given in loading manual, there is almost no accuracy loss. The results indicate that the proposed method has high accuracy and good real-time performance and has a certain practical application value.

Keywords

marine engineering, vessel's geometric properties, triangular mesh model, SH clipping algorithm, section contour, triangulation

Recommended Citation

Liu Chunlei, Yin Yong, Sun Xiaofeng, Zhang Xiufeng. Calculation of Vessel's Geometric Properties Based on STL Model[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2264-2271.

基于 STL 模型的船舶几何特性计算

刘春雷, 尹勇, 孙霄峰, 张秀凤

(大连海事大学 航海学院, 大连 116026)

摘要: 为提高船舶几何特性计算的精度和实时性, 提出一种基于 STL(Stereo Lithography)三角网格模型的船舶任意浮态下的几何特性计算方法。将计算机图形学中的 SH(Sutherland-Hodgman)剪裁算法用于船舶与水面的求交。基于坐标系仿射变换, 将空间水面转换成二维平面多边形来提取截面轮廓并完成其有序化。根据水面是单调多边形的特点, 采用质心插入法来进行三角剖分。以散货船“太行 128”为例进行实例验证, 其计算结果与装载手册中给定值相比较误差较小, 证明该方法计算精度高、实时性好, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 船舶工程; 船舶几何特性; 三角网格模型; SH 剪裁算法; 截面轮廓; 三角剖分

中图分类号: U66.2+1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 10-2264-08

Calculation of Vessel's Geometric Properties Based on STL Model

Liu Chunlei, Yin Yong, Sun Xiaofeng, Zhang Xiufeng

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

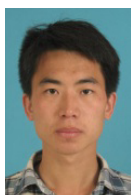
Abstract: To improve the accuracy of the ship geometric properties calculation and the real-performance of the program, a method based on STL triangular mesh model was proposed to calculate the ship geometric properties. SH polygon clipping algorithm in computer graphics was used to calculate the intersection of ship and water plane. By using of coordinates systems affine transformation, 3D water plane was changed to 2D plane to extract the profile contour. Because the waterlines are monotone polygon, Mass center insertion method was proposed to finish polygon triangulation, computing speed was improved. Bulk carrier "Taihang 128" was taken as an example, comparing the calculated results with the data given in loading manual, there is almost no accuracy loss. The results indicate that the proposed method has high accuracy and good real-time performance and has a certain practical application value.

Keywords: marine engineering; vessel's geometric properties; triangular mesh model; SH clipping algorithm; section contour; triangulation

引言

船舶任意浮态下的几何特性计算具有十分重要的意义, 是船舶浮态、完整稳性、破舱稳性、强度校核、阻力及适航性等计算的基础。传统方法^[1]

是根据船舶的二维型值表通过纵向积分进行计算, 精度相对较低; 文献[2-3]给出了基于加密数字型值表船舶几何特性的计算方法, 提高了计算精度, 但加密型值表数据量大, 实时性不好, 需要简化船舶加密型值数据; 文献[4]基于 CATIA 平台进行二次开发, 通过实体建模的方式实现了船舶任意浮态下的几何特性计算, 需要人工建模, 从其计算结果看, 精度不是十分理想, 且由于是二次开发, 程序的移植性和自主性会受到影响; 文献[5-8]基于 NURBS 曲面表达计算船舶的几何特性, 相对于传



收稿日期: 2015-06-09 修回日期: 2015-07-24;
基金项目: 863 课题(2015AA016404); 交通部应用
基础研究项目(2014329225370);
作者简介: 刘春雷(1987-), 男, 河北人, 博士生,
研究方向为船舶静力学; 尹勇(通信作者 1969-),
男, 湖北人, 教授, 博士, 研究方向为虚拟现实技
术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2264 •

统的二维计算方法提高了计算精度。

随着计算机技术及数字造船技术的发展, 目前主流的船舶设计软件可直接输出船舶外壳及舱室的 STL(Stereo Lithography)三角网格模型数据。STL 三角网格数据以船舶设计完工数据为基础, 是船舶真实的数据, 其更能精确地描述船舶外壳及舱室信息。相比于数字型值表的表达方式, 其在舱容计算及破舱稳性计算等方面将有无可比拟的优势。

本文基于 STL 三角网格模型提出一种计算船舶任意浮态下几何特性的方法, 计算精度较高, 实时性较好。其关键技术如下: (1) STL 模型文件解析及读取; (2) 三角网格和空间平面切割求交; (3) 截面(水线面)轮廓线的提取及有序化; (4) 截面(水线面)的三角剖分; (5) 基于三角网格模型的船舶几何特性计算。

1 STL 模型的解析及读取

STL 文件又称立体光造型文件, 是三维实体模型经过三角化后得到的模型文件, 其在科学计算可视化、计算机动画、虚拟现实及快速成形等领域中应用广泛。STL 文件无序地列出了构成实体表面的所有三角形面片的信息。每个三角形由 4 个数据项表示, 包括三角形的三个顶点坐标以及三角形平面的法矢量信息。

STL 文件分为 ASC II 和二进制两种格式, 本文采用的是 ASC II 格式。文件中包含若干个 Facet 信息单元, 每一个 Facet 由七行数据构成: 第 1 行为三角面片的指向实体外部的法矢量数据, 第 3, 4, 5 行是 3 个顶点的坐标信息。程序编制时只需要按存储规律解析 STL 文件, 循环取出每个三角形的坐标数据存入到相应链表中即可。

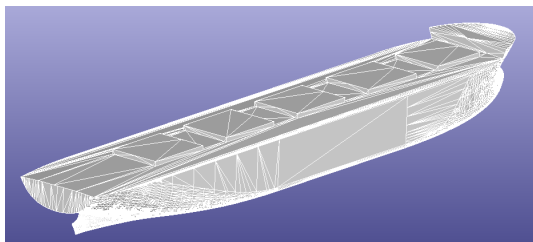


图 1 “太行 128”的 STL 网格模型

以散货船“太行 128”为例, 如图 1 所示为其 STL 三角网格模型, 共包含 15032 个三角面片, 由 NAPA 船舶设计软件设计完成后导出。图 2 所示为“太行 128”的某货舱的三角网格模型。

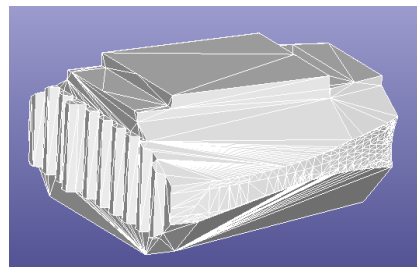


图 2 “太行 128” NO1 货舱

2 基于 SH 剪裁算法的三角网格模型与平面求交

船舶任意浮态下几何特性计算的基础是船体网格与水线面的求交。即用水线面所确定的空间平面切割船体, 其本质是空间三角形与倾斜水线面的求交。

空间三角形与平面相交时有 8 种情况, 如图 3 所示, 文献[9-10]将上述 8 种情况归结为 5 类分别进行处理, 分类复杂且计算繁琐。本文应用计算机图形学中的 SH 剪裁算法, 无需进行分类, 可直接根据输出点的个数完成空间切割, 算法通用性较好, 易于编程实现。

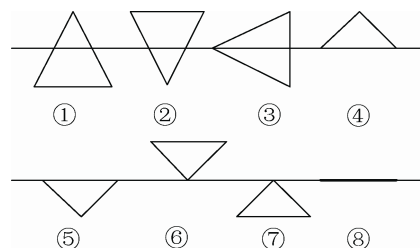


图 3 空间三角形与平面相交情况

2.1 SH 剪裁算法

SH(Sutherland-Hodgman)算法也叫逐边裁剪法^[2,11], 是多边形剪裁的一种高效算法。该算法是萨瑟兰德(I.E. Sutherland)和霍德曼(Hodgman)在 1974 年提出的。其采用分割处理、逐边裁剪的思

想。这一算法的总体策略是顺序的将每一多边形的一对顶点送给一组裁剪器(左、右、下、上)。如图 4 所示, 裁剪边界对多边形的边裁剪时有四种情况需要考虑: (1) 多边形边的第一端点在裁剪边界外部而第二端点在内部; (2) 两个端点都在裁剪边界内部; (3) 第一端点在边界内部而第二端点在边界外部; (4) 两个端点都在裁剪边界外部。

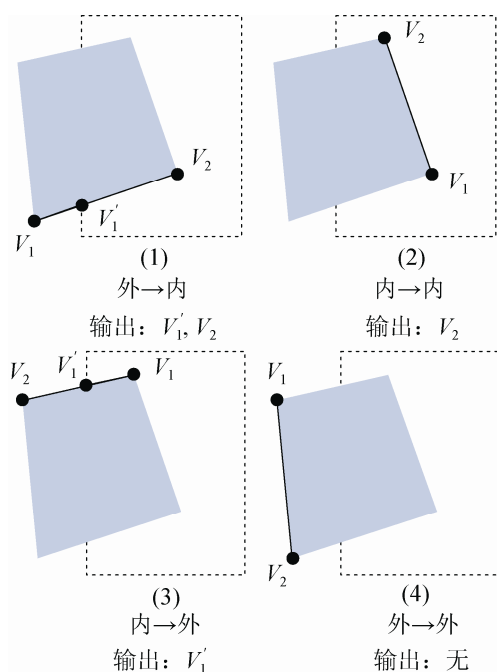


图 4 S-H 剪裁算法说明

2.1.1 边界内外判断

设平面的法向量为 $\mathbf{n}=(A,B,C)$, 平面的方程可表示为^[12]:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

空间点与空间平面内外关系可根据点到平面的有向距离 S 进行判断, 有向距离计算公式^[12]:

$$S = \mathbf{n} \cdot \mathbf{P}_k + D \quad (2)$$

当点 $\mathbf{P}_k$ 在平面法向所指的一面, 有向距离 S 为正值, 标记为外; 反之为负值, 标记为内。

2.1.2 空间线段与平面求交

设空间线段两个顶点坐标 $\mathbf{P}_1(x_1, y_1, z_1)$, $\mathbf{P}_2(x_2, y_2, z_2)$, 则交点^[11] $\mathbf{P}_{\text{cross}}$ 计算公式为:

$$\mathbf{P}_{\text{cross}} = \mathbf{P}_1 + (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1) \cdot t \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (3)$$

$$\text{式中: } t = \frac{-D - \mathbf{n} \cdot \mathbf{P}_1}{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)} \quad (4)$$

2.1.3 三角网格与水线面求交举例

以图 3 中①情况为代表进行举例分析, 如图 5 所示, 输入三角形的有序点列为 $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$ 。首先输入 $\overline{\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2}$ 到剪裁器, 属于由内到外的情况, 输出 $\mathbf{P}_1$ 和交点 $\mathbf{P}'_A$; 然后输入 $\overline{\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3}$ 到剪裁器, 属于由外到内的情况, 输出交点 $\mathbf{P}'_B$; 最后输入 $\overline{\mathbf{P}_3\mathbf{P}_1}$ 到剪裁器, 属于由内到内的情况, 输出 $\mathbf{P}_3$ 和 $\mathbf{P}_1$, 最终得到有序点列 $\mathbf{P}_1\mathbf{P}'_A\mathbf{P}'_B\mathbf{P}_3$ 。

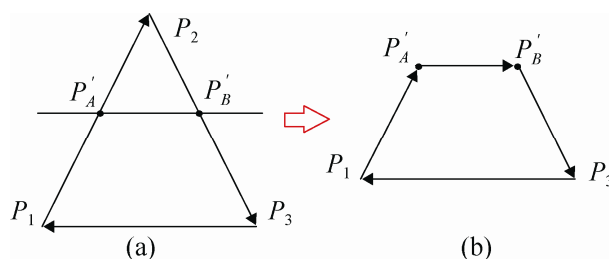


图 5 剪裁举例

2.2 三角网格模型切割算法描述

为方便叙述, 假设存储 STL 原始模型的三角形链表为 $\text{Tri}[]$, 存储切割完成后模型的三角形链表为 $\text{OutputTriList}[]$, 存储切割截面轮廓点的点链表为 $\text{SectionList}[]$ 。算法描述如下:

步骤 1: 解析 STL 模型格式, 循环读取三角形信息存入三角形链表 $\text{Tri}[]$ 中, 自定义的三角形结构体包含三角形的三个顶点坐标及法向量信息。

步骤 2: 遍历链表 $\text{Tri}[]$ 中的每一个三角形和切割平面(水线面)进行 SH 剪裁, 输出的是一系列的有序点列, 存储到点链表 $\text{Pt}[]$ 中。

步骤 3: 判断点链表 $\text{Pt}[]$ 存储点(去除重复点后)的数量 count : 若 $\text{count}=0$, 三角形在切割平面之上, 不进行处理; 若 $\text{count}=1$, 此时对应图 2 中的情况⑥, 输出点是截面轮廓上的点, 存储到轮廓点表 $\text{SectionList}[]$ 中; 若 $\text{count}=2$, 对应图 2 中情况④, 将两个点添加到点表 $\text{SectionList}[]$ 中; 若

count=3, 对应图 2 中情况②、③、⑤、⑦、⑧, 将这三个点构成的三角形添加到链表 `OutputTriList[]` 中, 判断这 3 个点到平面的有向距离, 将有向距离为 0 的点添加到轮廓点表 `SectionList[]` 中; 若 Count 等于 4, 此时对应图 2 的情况①, 根据 Delaunay 三角网格划分中“三角形最小内角和最大”的原则, 将这四个点划分成两个三角形, 并全部添加到链表 `OutputTriList[]` 中, 找出 4 个点中有向距离为 0 的点添加到轮廓点表 `SectionList[]` 中。

步骤 4: 所有三角形遍历完成后, 本模块结束, 进入剖面点表的有序化及截面的三角剖分处理。

2.3 程序设计流程图

图 6 所示为三角网格模型与空间平面切割的程序设计流程图。

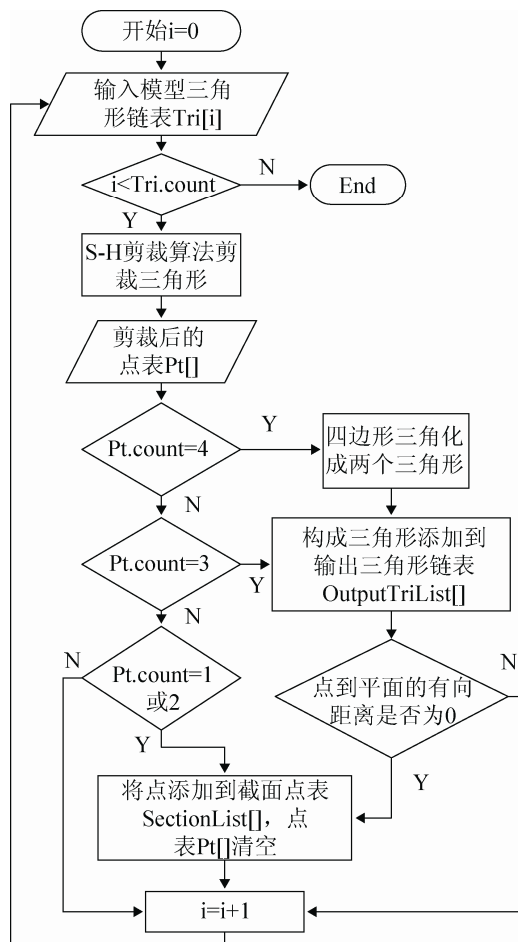


图 6 三角网格模型切割流程图

2.4 切割实例

本文基于 Microsoft Visual Studio 2013(C#)+ OpenTK 平台, 完成了 STL 三角网格模型的实时切割程序编制。如图 7 所示, 分别为“太行 128”及奶牛与空间平面切割的结果, 图中红色部分所示为水线面轮廓的离散点, 其是无序的, 后文将介绍如何将其有序化。

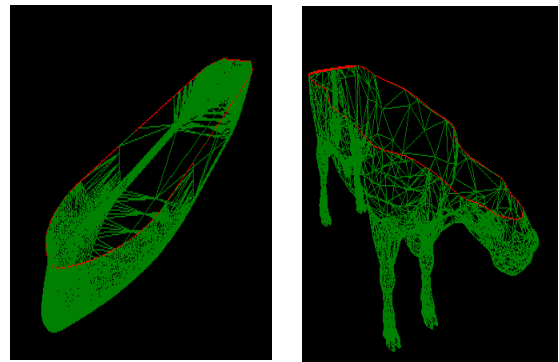


图 7 STL 三角网格模型切割

3 基于仿射变换的截面轮廓提取

船舶与水线面切割完成以后, 需要提取水线面边界数据。在提取截面轮廓时, 文献[9-10,13]提出将所有无序相交线段存入到链表中, 然后开始递归搜索首尾相连的线段组成有序的多边形; 文献[14]先对三角面片进行排序然后通过追踪求交的算法来获取轮廓数据; 文献[15]通过动态搜索中哈希表的方法来提高搜索效率。这些算法本质上都是基于动态搜索的思想, 用在实时系统中, 效率不是很高。

本文根据船舶的自身特点提出一种效率较高的方法。由于剖面(水线面)是单调多边形^[16], 可通过坐标系仿射变换将三维平面降为二维, 问题就转化成二维平面中散乱点的凸包求解问题^[17], 仅需要简单的三次排序即可将边界散乱点有序化。其基本步骤为: (1) 通过坐标系仿射变换降维; (2) 二维平面散乱点的有序化; (3) 点的逆变换, 恢复成三维平面。

3.1 基于仿射变换三维平面降维

通过仿射变换, 旋转平面的法向量使其和坐标轴 OZ 轴平行, 使平面的 Z 坐标值全部相等, 达到降维目的。

如图 8 所示, 假设法向量不平行于任何坐标轴, 则可以建立下列局部坐标系单位向量组^[11]:

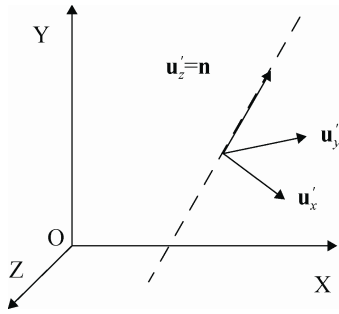


图 8 仿射变换

$$\begin{cases} u'_z = n \\ u'_y = \frac{n \times n_x}{|n \times n_x|} \\ u'_x = u'_y \times u'_z \end{cases} \quad (5)$$

如果将法向量的局部单位向量表示为:

$$\begin{cases} u'_x = (u'_{x1}, u'_{x2}, u'_{x3}) \\ u'_y = (u'_{y1}, u'_{y2}, u'_{y3}) \\ u'_z = (u'_{z1}, u'_{z2}, u'_{z3}) \end{cases} \quad (6)$$

则将法向量旋转和 Z 轴平行的矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} u'_{x1} & u'_{x2} & u'_{x3} & 0 \\ u'_{y1} & u'_{y2} & u'_{y3} & 0 \\ u'_{z1} & u'_{z2} & u'_{z3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据式(1)给定的平面方程, 代入式(7), 变换矩阵 M 可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} V & -\frac{AB}{V} & \frac{AC}{V} & 0 \\ 0 & \frac{C}{V} & \frac{-B}{V} & 0 \\ A & B & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中:

$$V = \sqrt{B^2 + C^2}$$

设变换后的坐标点为 P' , 变换前为 P , 则可建立它们之间的变换关系:

$$P' = MP \quad (9)$$

设 M^{-1} 为 M 的逆矩阵, 则有

$$P = M^{-1}P' \quad (10)$$

3.2 截面轮廓点表的有序化

截面轮廓的数据点提取完成以后, 这些点是散乱无序的, 需要对其有序化得到正确的水线面数据。便于叙述, 引入以下定义^[17], 如图 9 所示:

定义 1: 设 $P = \{P_i; i=1, 2, \dots, n\}$ 为散乱点集合, P 中 x 坐标值最小的点为集合的左值点, 记为 P_L ; 同理, x 坐标值最大的点为集合的右值点, 记为 P_R 。

定义 2: 从 P_L 指向 P_R 的有向线段称为 P 的分界线。

定义 3: 有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 将平面分成左半平面和右半平面两个平面, 平面内任意一点 $V = (x, y)$ 与 $\overrightarrow{AB}$ 的叉积可得到点与直线的位置判断函数:

$$F(V, \overrightarrow{AB}) = (y_A - y_B)x + (x_B - x_A)y + (x_A y_B - x_B y_A) \quad (11)$$

若 $F > 0$, 点 V 在 $\overrightarrow{AB}$ 的左半平面; 若 $F = 0$, 点 V 在 $\overrightarrow{AB}$ 的直线上; 若 $F < 0$, 点 V 在 $\overrightarrow{AB}$ 的右半平面。

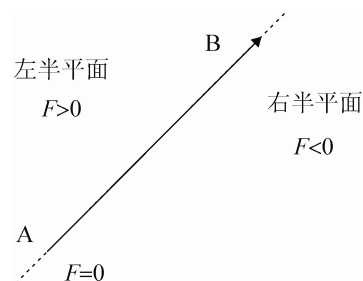


图 9 平面的划分

截面轮廓的有序化可通过三次简单的排序完

成, 基本算法可描述为:

步骤 1: 对散乱点集 P 按照坐标 x 从大到小的顺序进行排序, 如果 x 坐标值相等就按照 y 值降序排列, 找出左值点 P_L 和右值点 P_R ;

步骤 2: 遍历点集中的每个点, 根据定义 3, $F > 0$ 的点存入到新链表 P_1 , $F < 0$ 的点存入到新链表 P_2 ;

步骤 3: 链表 P_1 按坐标 x 降序排列, 链表 P_2 按坐标 x 升序排列, 组合添加到新链表中, 即可得到截面多边形的有序点列。

步骤 4: 每个点代入式(10)进行矩阵的逆变换, 得到空间截面的所有坐标存入到相应链表中。

3.3 验证实例

如图 10 所示为截面轮廓有序化后的效果, 图中白线部分为左半平面边界的可视化效果, 红线部分为右半平面边界的可视化效果, 将这两部分有序点列添加到新的有序链表中即可得到截面(水线面)的轮廓信息。

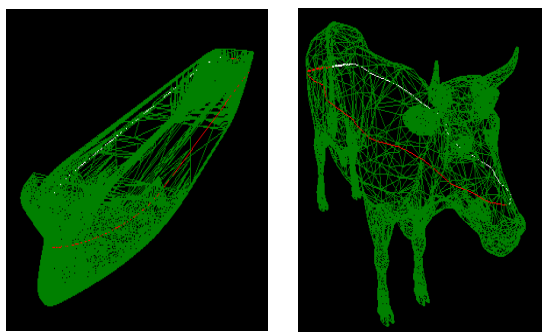


图 10 截面边界的有序化

4 截面轮廓三角剖分

截面(水线面)轮廓数据有序化完成后, 还需将其三角剖分, 与切割完的部分构成封闭的三角网格实体模型。多边形三角化算法有很多: 文献[18]给出一个任意多边形的 Delaunay 三角剖分算法, 其时间复杂度为 $O(N^2)$; 文献[19]提出基于凹凸顶点判定的简单多边形的三角剖分算法, 先计算多边形顶点的凹凸性, 然后用环形追踪算法

并通过局部优化得到一个较好的三角剖分。这两种算法虽然得到的三角形效果较好, 但是需要多次循环计算和局部优化降低了算法的执行效率。文献[20]采用内角判定法, 通过判断相邻三点构成的内角来三角化, 当多边形有 N 个顶点时, 至少需要构建 $N-2$ 个三角形, 理想的凸多边形情况下, 需计算 $N-2$ 次内角。假设 50% 概率遇到大于 180 的内角, 则需要 $2 \times (N-2)$ 次内角计算。

为提高程序的实时性, 根据水线面是单调多边形的特点, 通过插入质心点法完成水线面的三角化。只需要计算出质心坐标, 然后仅通过一次遍历, 将多边形的相邻两点和质心相连构成三角形, 不需要任何角度及凹凸性计算, 即可完成多边形的三角化, 提高了程序实时性。其中, 多边形质心(水线面漂心)计算公式为^[3]:

$$\begin{cases} \mu_x = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^n (x_{k+1} + x_k)(x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k) \\ \mu_y = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^n (y_{k+1} + y_k)(x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k) \end{cases} \quad (12)$$

4.1 实例

如图 11 所示, 图中部分为质心插入法的截面轮廓三角剖分效果, 其与绿色三角形部分构成一个完整的三角网格实体模型, 在此基础上可精确计算模型的几何特性。

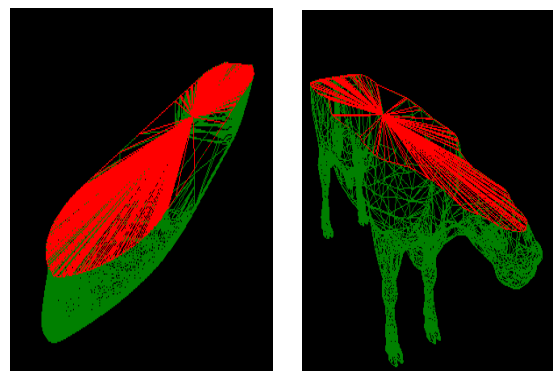


图 11 截面三角剖分

5 基于有向四面体的几何特性计算

船舶几何特性计算包括船舶工程中经常用到

的排水体积、浮心、水线面积及漂心。文献[5-6]通过构造广义三棱柱来计算船舶的几何特性,需要进行分类。本文采用的是基于有向四面体的计算方法^[7,10],通用性较好。

船舶模型与水线面切割完成后得到的封闭三角网格实体模型后,每一个三角形与坐标原点构成一个有向四面体。分别计算出这些有向四面体的几何特性,进行累加即可得到整体的几何特性。

设三角形的三个顶点分别为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$, 则与坐标原点组成的每一个有向四面体的有向体 V 及浮心坐标 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ 计算公式为^[7,10]:

$$\begin{cases} V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \\ X_c = \frac{1}{4}(x_1 + x_2 + x_3) \\ Y_c = \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3) \\ Z_c = \frac{1}{4}(z_1 + z_2 + z_3) \end{cases} \quad (13)$$

6 算例验证

本文基于 Microsoft Visual Studio 2013(C#)+OpenTK 平台,以散货船“太行 128”为例,完成了三角网格模型的实时切割及几何特性计算的程序编制。表 1~5 所示为本文方法的几何特性计算结果和装载手册给定值比较结果。

表 1 “太行 128”型排水体积计算结果

T/m	VOLM/m ³		
	手册数据	本文方法	相对误差
2.0	9036.9	9031.676	-0.0578%
4.0	19113.0	19105.49	-0.0393%
6.0	29617.4	29608.72	-0.0293%
8.0	40528.0	40517.2	-0.0267%
10.0	51897.2	51882.87	-0.0276%
12.0	63586.0	63570.46	-0.0244%

表 2 “太行 128”型浮心纵向坐标计算结果

T/m	LCB/m		
	手册数据	计算数据	相对误差
2.0	104.800	104.817	0.0162%
4.0	104.432	104.442	0.0096%
6.0	103.858	103.866	0.0077%
8.0	102.771	102.779	0.0078%
10.0	101.119	101.127	0.0079%
12.0	99.580	99.585	0.0050%

表 3 “太行 128”浮心垂向坐标计算结果

T/m	VCB/m		
	手册数据	计算数据	相对误差
2.0	1.030	1.037	0.6796%
4.0	2.069	2.077	0.3867%
6.0	3.108	3.116	0.2574%
8.0	4.156	4.163	0.1684%
10.0	5.217	5.225	0.1533%
12.0	6.280	6.287	0.1115%

表 4 “太行 128”水线面积计算结果

T/m	Aw/m ²		
	手册数据	计算数据	相对误差
2.0	4889.9	4888.596	-0.0267%
4.0	5155.5	5155.1	-0.0078%
6.0	5348.9	5348.585	-0.0059%
8.0	5568.1	5567.353	-0.0134%
10.0	5781.2	5780.693	-0.0088%
12.0	5902.6	5902.12	-0.0081%

表 5 “太行 128”漂心纵向坐标计算结果

T/m	LCA/m		
	手册数据	计算数据	相对误差
2.0	104.451	104.462	0.0105%
4.0	103.674	103.683	0.0087%
6.0	101.643	101.662	0.0187%
8.0	97.641	97.659	0.0184%
10.0	93.472	93.48	0.0086%
12.0	92.245	92.246	0.0011%

分析表中数据,“太行 128”型排水体积计算 VOLM 的最大相对误差为 0.0578%,浮心纵坐标 LCB 的最大相对误差 0.016 2%,浮心纵坐标 VCB 的最大相对误差为 0.679 6%,水线面积 Aw 的最大相对误差为 0.026 7%,漂心纵向坐标

LCA 的最大相对误差为 0.010 5%。可见本文的计算值和装载手册给定值相对误差较小, 具有较高的计算精度, 验证了文中所述方法的正确性。

7 结论

本文基于 STL 三角网格模型完成了船舶任意浮态下的几何特性计算, 可得到如下结论:

(1) STL 数据直接来源于船舶设计数据, 减少了人工干预, 计算精度较高。

(2) 文中提出的算法在保证计算精度的基础上力求保证程序的实时性, 具有一定的工程实用价值。

(3) 三角网格与水线面切割求交算法适用于任意船型。但基于仿射变换的水线面的提取及三角剖分算法不具有普遍性, 仅适合水线面为单调多边形的大部分常规船型, 如散货、集装箱及油轮等, 不适用于如双体船等水线面带环形的等特殊船型。

文中所描述的方法已成功应用到自主研发的散货船配载仪软件中, 未来将进一步研究 STL 三角网格模型在稳性计算、耐波性及阻力预报等方面的应用。

参考文献:

- [1] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上册) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 20-44.
- [2] 刘春雷, 张秀凤, 孙霄峰, 等. 基于加密型值表的船舶静水力特性精确计算 [J]. 中国造船, 2013, 54(4): 163-176.
- [3] 刘春雷. 散货船智能化配载仪的研究与实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013: 9-14.
- [4] 曹晶, 陈明, 孙永刚. 基于 CATIA 的三维船舶静水力计算研究 [J]. 中国舰船研究, 2011, 6(2): 25-28.
- [5] 陆丛红, 林焰, 纪卓尚. 基于 NURBS 表达的船舶静水力特性精确计算 [J]. 船舶力学, 2007, 11(5): 691-701.
- [6] 陆丛红, 林焰, 纪卓尚. 基于曲面表达的几何特性计算及其在船舶工程中的应用 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(6): 697-703.
- [7] 张明霞. 基于 NURBS 曲面的船舶破舱稳性计算方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002: 96-97.
- [8] 何术龙, 周秀红, 李百齐, 等. 船舶型线设计系统软件开发 [J]. 中国造船, 2013, 54(2): 55-61.
- [9] 纪小刚. RP 系统中 STL 模型的分割与拼接研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003: 23-47.
- [10] 张小青. 基于三角网格模型的文物几何信息计算 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012: 17-37.
- [11] Hearn D, Baker M P, 蔡士杰. 计算机图形学(3 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 273-277.
- [12] Schneider P J Eberly DH. 计算机图形学几何工具算法详解 [M]. 周长发译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 270-392.
- [13] 何朝明. 离散点云处理的关键技术研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2007: 39-55.
- [14] 潘海鹏, 周天瑞, 朱根松, 等. STL 模型切片轮廓数据的生成算法研究 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(17): 2076-2079.
- [15] 胡德洲, 李涤尘, 洪军, 等. 快速成形制造中截面轮廓快速生成算法研究 [J]. 中国机械工程, 2001, 12(6): 654-656.
- [16] 李学军, 黄文清. 平面区域三角化的快速算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(2): 233-238.
- [17] 金文华, 何涛, 唐卫清, 等. 简单快速的平面散乱点集凸包算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(1): 76-79.
- [18] 闵卫东, 唐泽圣. 二维任意域内点集的 Delaunay 三角划分的研究 [J]. 计算机学报, 1995, 18(5): 357-364.
- [19] 马小虎, 潘志庚, 石教英. 基于凹凸顶点判定的简单多边形 Delaunay 三角剖分 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11(1): 2-4.
- [20] 刘少华, 汤军, 吴东胜, 等. 简单多边形三角剖分的一种快速算法及应用 [J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(3): 79-80.