飞行器 RCS 计算前置处理中裁剪曲面剖分算法

胡毕富 宋玉旺 赵 晖 席 平

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 在雷达散射截面(RCS)计算中,首先需要将物体的表面进行三角剖分,称为前置处理,三角片单元的边长通常为 0.1 个波长(一般 1 个波长取 3 cm). 飞行器外表形状复杂,在建立数学化模型中,使用了大量的裁剪曲面,曲面之间的关系非常复杂,而 3 mm 边长的三角片剖分,使得飞行器的三角片单元的数目巨大,给前置处理带来难度. 对此,提出了一种裁剪曲面三角网格剖分的方法. 利用飞行器外形设计的特点,在以拱高为逼近误差的前提下,把曲面离散一系列等参数线,等参数线上等弦长布点,两两参数值相邻的参数线生成网格单元. 根据网格单元与裁剪区域的位置关系,将落在裁剪区域外的网格单元进行裁剪处理. 然后对曲面间边界处的网格进行相容性处理,最终实现多张裁剪曲面的三角网格剖分.

关 键 词: 有限元; 雷达散射截面; 裁剪曲面; 网格剖分; 三角剖分

中图分类号: TP 391.7

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0267-04

Algorithm of trimmed surface triangulation of prepositive disposal in predicting RCS of aircraft

Hu Bifu Song Yuwang Zhao Hui Xi Ping

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: While computing radar cross section (RCS), surfaces of objects were primarily triangulated, which was called prepositive disposal. The length of the edge of the triangle was generally 0.1 wavelength (in general one wavelength is 3 cm). The shape of aircrafts was complex , aircrafts' geometric model contained many trimmed surfaces, the relationship between trimmed surfaces was complex. Meanwhile surfaces were triangulated into many triangles with the edge of 3 mm, therefore the number of triangles was huge. All these resulted in difficulties in the prepositive disposal. An algorithm of trimmed surfaces triangulation was put forward. Using the characteristic of aircraft model and satisfying the approach error the surface was dispersed by isoparametric curves, the curves were dispersed into points at the given length and the meshes were composed of points on two adjacent isoparameteric curves. According to the position relation of meshes and the trimmed area meshes which were out of the trimmed area were trimmed. Then meshes on the surfaces boundaries were converted into being consistent. Triangulation of trimmed surfaces can be realized.

Key words: finite element; radar cross section; trimmed surface; mesh generation; triangulation

雷达散射截面(RCS)是衡量飞行器的隐身性能的主要参数,其理论分析是根据各种电磁散射理论研究目标产生散射场的各种机理,并利用各种近似计算方法和计算机技术定量预估各种情况下目标的雷达截面特征[1].

目前 RCS 的理论分析有 2 种方式,实物模型测试法和计算法,随着计算机技术的发展,计算法得到了快速发展和应用. RCS 计算有高频和低频之分,高频方法属于粗略计算,模型处理简单. 低频方法属于精确计算,低频方法的 RCS 计算和有

收稿日期: 2005-06-27

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2003AA411350)

作者简介: 胡毕富(1980-), 男, 贵州晴隆人, 博士生, hubye@163.com.

限元方法一样,需要对模型进行几何处理即把模型处理为简单的单元,然后对每一个单元进行电磁场的计算,最终得到RCS的大小.

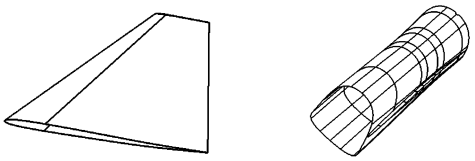
低频RCS计算中,对三角网格的技术要求可归纳为:①三角片的边长一般为0.1λ(λ为电磁波的波长,可按需给定,一般取3 cm);②边界相容性;③三角片的正规性. 对飞行器这个特殊目标体来说,三角剖分除要满足RCS要求外,自身特点为:①表面模型存在大量的裁剪曲面;②三角片数量为百万甚至千万数量级别. 因此飞行器曲面剖分难点是裁剪曲面剖分和提高曲面剖分速度.

裁剪曲面的剖分算法的研究已经有人做了大量的工作,到目前为止,国内外的研究者发表了许多有关曲面剖分的文章,从不同的角度对曲面剖分进行了大量深入的研究,形成了映射法、基于栅格法、Delaunay三角剖分方法、推进波前法[2],但针对RCS的曲面剖分算法的相关文献较少.

目前许多建模软件采用了NURBS方法表示曲面,本文针对NURBS方法,基于飞行器RCS计算的要求,根据飞行器外形设计的特点,从提高网格的质量和剖分速度的角度出发,提出了以拱高为逼近误差的曲面三角剖分算法.

1 原始曲面的网格生成

飞行器外形设计通常是根据一系列的截面曲线(一般是平面曲线)通过放样或者扫掠、蒙面的方法而得到,这类曲面的表面积占到总表面积的约80%~90%,其特点为:①平行于截面的等参数基本上是平面曲线;②截面方向的曲线曲率变化比较大,另一个方向的曲线的曲率变化较小,如机身、机翼处的曲面,如图1所示.



a 机翼处的曲面 b 机身处的曲面

图1 外形曲面

采用有理分式表示NURBS曲面方程,一张$p\times q$次NURBS曲面可以如式(1)所示.

$$\boldsymbol{r}(u,v)=\frac{\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}w_{ij}\boldsymbol{P}_{ij}N_{ip}(u)N_{jq}(v)}{\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}w_{ij}N_{ip}(u)N_{jq}(v)} \quad (1)$$

式中,控制顶点$\boldsymbol{P}_{ij}$,$i=0,1,\cdots,m$;$j=0,1,\cdots,n$呈拓扑矩形排列,形成一个控制网格. ω_{ij}是与$\boldsymbol{P}_{ij}$联系的权因子,规定四角顶点处用正权因子即ω_{00},ω_{m0},ω_{0n},$\omega_{mn}>0$,其余$\omega_{ij}\geqslant 0$. $N_{ip}(u)$,$i=0,1,\cdots,m$和$N_{jq}(v)$,$j=0,1,\cdots,n$分别为u向p次和v向q次的规范B样条基. 它们分别由u向与v向的节点矢量$\boldsymbol{U}=[u_0\quad u_1\quad\cdots\quad u_{m+p+1}]$与$\boldsymbol{V}=[v_0\quad v_1\quad\cdots\quad v_{n+p+1}]$确定[3].

1.1 曲面曲率较大方向的确定

根据飞行器的外形特点和NURBS曲面的特点,对曲面的曲率较大的方向判断可根据控制顶点之间的积累弦长相互关系进行判断. 具体的处理过程为:先从曲面的u方向进行,对u方向上的每一行控制顶点进行累加弦长即求2个控制顶点间的距离都累加起来与该行首末控制顶点距离之比,然后对每行进行类似的处理,取u向的平均数;再对v向进行类似的处理找出其平均值;比较2个方向的值,最大值为曲面曲率较大的方向.

1.2 曲面的自适应离散

以曲率较大方向为截面方向,若出现一个方向上曲面的2个角点重合,则取另一个方向作为截面方向,与之相对的另一个方向上选取一条等参数线,按照边长为ε的正三角形的高0.866ε为离散步长,在保证拱高小于0.086 6ε的前提下离散成一系列点,这样就把曲面离散为以这些值在另一个方向的等参数线. 然后在这些等参数线上把它们按照ε为离散步长,拱高小于0.1ε的前提把截面方向的等参数线离散为一系列的点.

1.3 网格的生成

为提高网格生成速度,用两两参数值相邻的等参数线上点按某个规则生成网格,见图2. 在网格生成过程中取一条参数线作为基准等参数线,另一条作为非基准等参数线,在基准等参数线上取2个点n_1和n_2组成一条边,然后在非基准等参数线上找点m_1形成$\triangle n_1n_2m_1$,这样依次进行网格的生成. 在网格生成的整个过程中是以新连元的三角片不能与已有的三角片相交为前提.

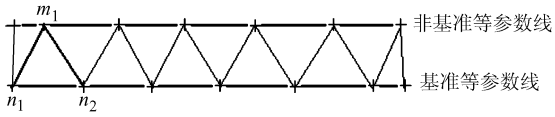


图2 网格生成示意图

1.4 网格信息的存储

为减少数据存储量,使用3个一维数组来存储三角片的网格信息. 第1个数组存储三角片的顶点点列,包括点的坐标x,y,z. 第2个数组存储三角片的边信息,包括边的2个顶点在第1个数组中的位置和边属于三角片的编号,这个编号最

多为 2 个三角片的编号(因为 1 条边最多为 2 个三角片所共有). 第 3 个数组存储三角片单元,包括 3 个顶点分别在第 1 个数组中位置和 3 条边分别在第 2 数组中位置.

2　网格的裁剪处理

裁剪 NURBS 曲面信息包括原始的非裁剪曲面和一个外环和 n 个内环(n 大于或等于零),并且外环按照逆时针方向(对于 uv 方向),如果有内环,则内环按照顺时针方向组成的组合曲线. 所以对于裁剪曲面剖分,首先对原始非裁剪曲面剖分,然后把在内环内的点和外环外的点删除,最终形成裁剪曲面的网格. 裁剪 NURBS 曲面见图 3.

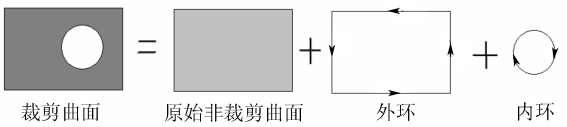


图 3　裁剪 NURBS 曲面的表示

2.1　是否在裁剪曲面上点的判断

目前判断一个点是否在环内的方法有叉乘法、面积法、三角形分割法、有向夹角累加法、射线法[4]. 这些方法各有特点,考虑到非裁剪曲面的布点是在等参数线上,根据射线法的基本思想,对每一条参数线首先求其与环的交点(在参数域),然后根据交点的奇偶数特点(交点顺序如果是等 u 线则按照 v 值的大小进行编号,如果是等 v 线则按照 u 值大小进行编号)判断点是否在裁剪曲面上,如果该点不在裁剪曲面上,修改该点的属性为“不可见”和记录该点被置为不在曲面上的环的编号(环的编号从外环开始编号).

2.2　网格裁剪处理

为了保证网格裁剪处理后的网格单元的质量,首先调整与环上点列最近的在裁剪曲面上的离散点,然后建立边的新的拓扑信息,根据这些边的拓扑信息,找出三角片之间的拓扑信息即一个三角片周围的三角片,最后根据三角片拓扑信息找出与环相交的三角片,这样减少了搜索与环相交每一个三角片的时间.

1) 与环相交边的顶点调整. 已经确定了裁剪曲面上的点,保留非裁剪曲面网格的连接关系,根据三角片边的存储信息,可以判断出“可见边”即边的 2 个顶点都在裁减曲面上;“部分可见边”即边有一个顶点在裁剪曲面上,另一个点不在;“不可见边”即是 2 个顶点都不在裁剪曲面上.

对于“可见边”和“不可见边”在 1) 不作处理. 由于“可见边”和“不可见边”与环可能有交,所以放在 3) 与环相交三角片中去处理.

对于“部分可见边”的处理,根据不在裁剪曲面上点的环信息,找出与在裁剪曲面上点的最近距离的边界点,比较边界点与裁剪曲面上点的距离与某一个给定的值(取 0.5 个 ε),如果小于则把裁剪曲面上点修改为边界点,并设定该点是否在边界上的属性是真,记录边界点所在边界数组中的下标;如果大于则把不在裁剪曲面上的点修改为边界点,并把该点是否在边界上的属性和点是否在裁剪曲面上设为真. “部分可见边”顶点的调整过程如图 4 所示.

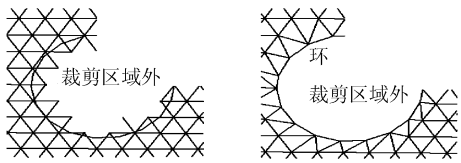
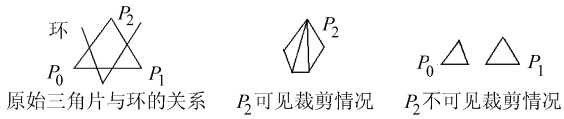


图 4　“部分可见边”顶点的调整

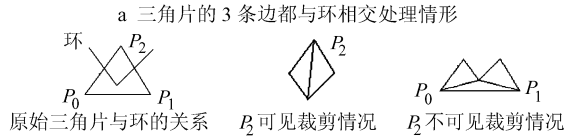
2) 寻找与环相交的三角片. 裁剪曲面上点调整过后边的信息发生了改变,需要重新生成边的拓扑信息,然后根据边的拓扑信息生成三角片的拓扑信息. 首先搜索一个与环相交的三角片,然后根据这个三角片向其 3 条边的方向向外推动寻找下一个与环相交的三角片,直到寻找完所有与该环相交的编号,并记录下环的编号;同样的方法寻找与其他环相交的三角片,直到与所有的环相交的三角片寻找完毕.

3) 与环相交三角片处理. 根据组成三角片的边是否与环相交可以判断出与环相交的三角片,这类单元需要进行处理,处理情况如图 5 所示,其中 P_0,P_1,P_2 为顶点.

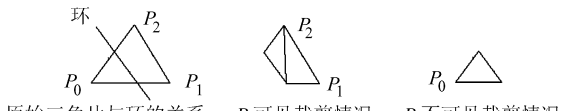
根据裁剪区域的关系,如果在一个点“可



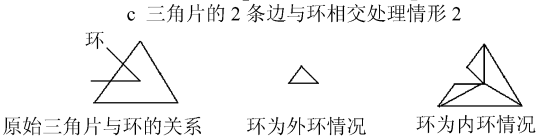
a 三角片的 3 条边都与环相交处理情形



b 三角片的 2 条边与环相交处理情形 1



c 三角片的 2 条边与环相交处理情形 2



d 三角片 1 条边与环相交处理情形

图 5　与环相交三角片的处理

见”,则在该区域就为裁剪曲面上的区域,如图5a所示,如果 P_2“可见”,则 P_0 和 P_1 所在的区域一定不是裁剪曲面的区域. 图5d是一条边与环有交,则根据环是内外环来进行裁剪处理.

3 曲面间网格相容性处理及实例

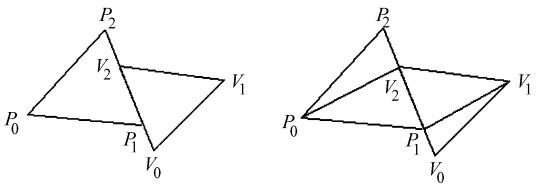
3.1 相容性处理

由于网格相容性的处理比较繁琐,在目前网格生成的文献中关于网格相容性的处理仅有少量的文献涉及. 基本思想是:

1) 建立曲面之间的邻接关系图[5];

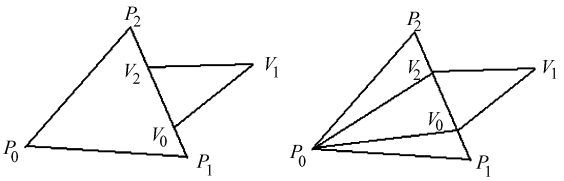
2) 把曲面的边界离散成一系列折线段,用折线段统一曲面之间有邻接关系边界的离散[6].

受到此启发,设计了曲面相容性处理的算法,首先根据曲面包围盒判断有邻接关系的曲面,再对有邻接关系每一个曲面的处于边界上的三角片进行比较,然后进行相容性处理. 邻接关系曲面的两两三角片有如图6和图7所示的情形,其中,V_0, V_1, V_2 为顶点.



a 原始的三角片 b 处理后的三角片

图6 三角片“交错”关系相容性处理



a 原始的三角片 b 处理后的三角片

图7 三角片“包含”关系相容性处理

对于图6和图7中的两两三角片的相容性处理,当 $|V_0P_1|$ 和 $|V_2P_2|$ 小于某一个值时(取为 0.25ε)则分别合并2个点以避免出现质量不好的三角片.

3.2 剖分实例

以飞机的机头部分的外形的IGES格式的文件输入,裁剪曲面为62张. 如图8所示.

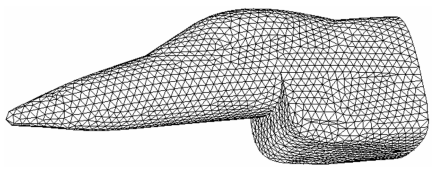


图8 网格剖分图

4 结束语

对于飞行器来说,3 mm边长的三角片单元的数目是百万甚至千万数量级并且网格的质量直接影响了RCS计算精度. 由于算法直接在曲面上进行布点,网格能反映曲面的形状并保证了网格的质量,节点连元是以两两等参数线上的点为对象形成网格不像波前法和Delaunay那样需要反复的对网格点的比较判断,这样缩短了寻找网格合适点的搜索时间.

参考文献 (**References**)

[1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.1~12
Ruan Yingzheng. Radar cross section and sealth technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 1~12 (in Chinese)

[2] 关振群,宋 超,顾元宪,等. 有限元网格生成方法研究的新进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(1):1~14
Guan Zhenqun, Song Chao, Gu Yuanxian, *et al*. Recent advances of research on finite element mesh generation methods[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(1):1~14 (in Chinese)

[3] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京:高等教育出版社,2001.262~267,310~312
Shi Fazhong. Computer aided geometric design & non-uniform rational B-spline[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 262~267,310~312 (in Chinese)

[4] 官火梁. 飞行器RCS计算中射线追踪模块的研究与实现[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2005.18~25
Guan Huoliang. Research and realization of ray tracing in predicting RCS of aircraft[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. 18~25 (in Chinese)

[5] Inouea K, Itoha T, Yamadaa A, *et al*. Face clustering of a large-scale CAD model for surface mesh generation[J]. Computer-Aided Design, 2001, (33):251~261

[6] 张 苏. 板料冲压成形数值模拟中网格的研究及程序实现[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2005.58~71
Zhang Su. The research and implementation on mesh for sheet metal stamping numerical simulation[D]. Beijing: Schoolf of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. 58~71 (in Chinese)