复杂目标 GRECO 方法的分屏显示计算

张云飞 马 骏

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 图形电磁计算(GRECO)是一种计算复杂目标雷达散射截面(RCS)的有效方法,但必须先有一个易于提取外形参数的数据文件. 基于 GRECO 法,针对用各种通用商业软件造型生成的模型文件,利用商业软件 Rhino 进行转化,生成适于 RCS 计算的数据文件,这种处理数据的方法具有广泛的适用性,且不会丢失任何局部细节. 通过分屏显示计算方法,提高了对电大尺寸目标的计算精度;采用 OpenGL 的显示列表技术使得程序运行花费较少的时间. 结合 GRECO 的特点,提出了一种分析目标散射源的简便的方法,便于分析目标的雷达散射截面特性. 结果表明,本方法与面劈法的计算结果吻合较好,具有较好的工程应用价值.

关 键 词: 电磁波散射; 雷达反射; 图形电磁计算; 图形显示器

中图分类号: V 218; TN 974

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)12-1332-05

Multi-screen display calculation method of GRECO for complex targets

Zhang Yunfei Ma Jun

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Graphical electromagnetic computing (GRECO) is an effective method of predicating the radar cross section(RCS) of complex targets, but there must beforehand be a model file from which the shape parameter can be easily obtained. Based on the GRECO, the model file generated by several commercial shaping software could be converted to the type fitting for the RCS calculation by means of the commercial software RHINO. The processing method of data had a wide use and may not delimit any details of model. The multi-screen display calculation method was used to improve the precision of calculation when predicting the RCS of electrically large and full size targets. By using display list technology of OpenGL, the program expended less time than before. A simple approach was also presented by which the scattering source of targets can be analyzed expediently. The good agreement between the calculating results of our method and that of plate-edge method indicates that this method possesses practical value in engineering.

Key words: electromagnetic wave propagation; radar reflection; graphical electromagnetic computing; graphic displays

虽然电子技术的飞速发展使目前的计算机无论是运算速度还是存储容量都比以前有了极大的提高,但对于复杂目标的 RCS(Radar Cross Section)计算问题,各种数值方法仍然受到计算机内存容量和计算速度的限制. 对那些电尺寸为十几个波长以上的目标来说,各种高频方法仍是最有效的预估方法.

图形电磁计算(GRECO)自从文献[1]提出以来,得到了很大发展. 该方法的发展、改进的内容主要是提高计算精度、效率和方便造型、提高适用性 2 方面. 但由于图形电磁计算法实际上是以显示器的像素为面元进行计算的,因此其计算精

收稿日期: 2004-10-12

作者简介: 张云飞(1964-),男,湖南长沙人,教授, cloud _ zhang@ buaa. edu. cn.

度和适用范围必然受到分辨率的限制. 文献[2]~文献[5]研究了提高计算精度的问题,其中文献[5]提出了复杂大目标的分区显示与复杂部件的逐个显示计算方法. 在造型建模方面,有的文献,如文献[6]利用 Catmull-Rom 样条建立模型,虽然在造型方面具有足够的精度,但使用起来不是很方便;有的文献,如文献[7]~文献[9]采用的是广泛使用的 NURBS 曲面模型,但无法处理用标准函数生成的形体如平面、圆柱、球等以及实体等非 NURBS 造型的形体,还会丢失形体的一些细节,例如机翼的后缘平面等. 国外近几年在此方面发表的文献甚少.

本文针对用各种通用商业软件如 CATIA,UG 等造型生成的模型文件(例如 IGES,STEP 格式文件),利用商业软件 Rhino 对其进行转化,生成适于 RCS 计算的数据文件,这种对模型文件的处理方法无论对 NURBS 曲面还是各种标准函数形体或是实体都具有广泛的适用性,且不会丢失任何局部细节;然后采用分屏显示的改进算法,提高目标的拟合精度,从而提高计算结果的精度,扩大图形电磁法的适用范围. 本研究还在图形电磁法预估结果的基础上,提出了一种较为简便的分析目标在某一角度下散射源的方法,便于设计人员分析和改进目标的雷达散射截面特性.

1　图形电磁法

GRECO 的基本思想是在计算机显示器上实现对目标的精确拟合,通过计算机的硬件实现被遮挡面的消隐,并且通过对目标的光照得到每个像素所代表面元的法向矢量和其它计算所需参数,然后以像素为面元利用高频近似算法进行计算. 其步骤如下:①读取目标造型文件或读取经转换后的目标造型文件;②显示目标,设置图形渲染参数,并按要求进行光照;③读取各像素法向矢量及深度值以及其它参数;④利用物理光学(PO)计算镜面散射;⑤等效电磁流(ECM)计算棱边散射;⑥计算目标 RCS 值.

1.1　目标造型文件的转化和读取

在大多数情况下,目标三维造型文件由造型软件(如 CATIA,AUTOCAD,3D MAX 等)来完成. 这些造型软件可以按照要求利用不同的曲面造型方法对目标的几何外形实现精确描述. 例如 Catmull-Rom 样条、贝齐尔(Bezier)曲面、非均匀有理 B 样条曲面(NURBS)等. 为了使 OpenGL 能够重构模型,要对这些曲面进行面元化.

文献[6]中采用了 Catmull-Rom 样条建模,但目前该样条的应用不是很广泛. 文献[9]以 IGES 文件作为输入,由于大多数造型软件都支持 IGES 文件,并且有国家标准,使得 GRECO 的适用范围有所扩大. 但 IGES 中几何元素很多,转化不完全的话有可能造成某些几何元素的丢失,若将其全部转化则工作量很大. 另一方面很多造型软件输出的 IGES 文件与国家标准不完全一致(如 Patran,3D MAX 等),这也增加了造型文件读取的难度. 为了完整准确地转化目标造型文件,本研究的模型面元化工作由成熟的商业软件 Rhino 来完成. Rhino 是一种 NURBS 建模工具,几乎涵盖了 NURBS 建模的各种功能[10]. 该软件可识别包括 igs,3ds,dwg 在内的大多数常用造型文件,并将目标造型转化为三角网格并以坐标的形式输出. 在输出时还可以按照曲率、网格长宽比等参数更合理地控制网格的划分. 本文用 Rhino 3.0 Evaluation 版本对多个复杂目标的造型文件进行了转化,通过对相关参数进行合理的设置,目标模型都得到了完整和较为准确的转化. 使用这种方法的唯一缺点就是转化后的文件偏大,一般会有几十兆,但对于当前的计算机应该是可以接受的.

1.2　目标造型的光栅化及参数提取

把目标的数学描述转换成计算机屏幕上像素的过程称为光栅化(rasterization),这个过程由 OpenGL 中填充三角面元的函数来完成. 通过对 Phong 氏光照参数的以及光源颜色和方向的设定,可以使得每个像素的颜色分量(R,G,B)与像素代表面元的单位法向矢量(n_x,n_y,n_z)中各分量一一对应. 因此包括 GRECO 的提出者在内的大部分研究者都认为面元的法向矢量是对模型进行光照得来的,但本文认为这种说法值得商榷,因为 OpenGL 程序中,对模型进行光照之前,必须先定义其顶点的法向矢量,一个物体的法线决定了该物体相对光源的方向[11],也就是说最后得到的法向矢量仍然是计算得出的. 对目标进行光照只是将剖分后各单元的法向矢量映射到其对应的像素上的过程.

1.3　利用高频近似算法计算目标 RCS

在满足电大尺寸以及良导体的条件下,用 GRECO 法对物理光学法的 RCS 计算公式变换得:

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{\mathrm{j}k}{\sqrt{\pi}}\int_s \cos\theta \mathrm{e}^{2\mathrm{j}kz}\mathrm{d}s \qquad (1)$$

式中,θ 为目标表面法矢与入射波的夹角;$k=2\pi/\lambda$ 为波数,λ 为雷达波长;z 是目标表面的深度值;

s为目标对于观察者可见部分的面积.

在GRECO中,s和ds分别为目标在屏幕上的可见部分和每个像素所代表实际面元. 当$\theta\to 90°$时,ds可能会变得很大,为了避免计算结果出现奇异值,文献[1]在式(1)引入$\sin(x)/x$函数,得到:

$$\sigma=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\sum_{像素}\frac{\sin(kl'\tan\theta)}{kl'\tan\theta}e^{2jkz'}\right|^2 \tag{2}$$

式中,l'为像素的宽代表的实际长度;z'为像素的深度值.

通过简单目标的RCS计算发现,这种离散方法仍然存在奇异点[9]. 文献[9]将像素代表的面元近似成矩形平板,引入了2个$\sin(x)/x$函数,得到:

$$\sigma=\frac{4a^4\pi}{\lambda^2}\left|\sum_{像素}\frac{\sin(kl\sin\xi\cos\varphi)}{kl\sin\xi\cos\varphi}\cdot\frac{\sin(kw\sin\xi\sin\varphi)}{kw\sin\xi\sin\varphi}e^{2jkz}\right|^2 \tag{3}$$

式中,ξ为入射线与目标表面法线的夹角;φ为入射线在面元上的投影与面元长轴的夹角;l和w分别为面元的长度和宽度.

对于边缘绕射部分采用的是等效电磁流法,具体可参照有关文献.

2 分屏显示算法

GRECO在计算目标RCS时,实际上是以像素为面元进行计算的,因此无论是计算精度还是应用范围都必然受限于显示器的分辨率. 一方面在显示大型目标的时候,每个像素代表的实际尺寸会变大,其与真实曲面之间的误差也就越大,以至于影响到计算精度;另一方面,在显示某些形状细长但雷达散射截面又相对较大的部件(如机翼后缘)时,由于其在显示器上的宽度不够一个像素而被忽略,这同样会影响到最终计算结果.

通过OpenGL的投影函数,可突破显示器分辨率的硬件限制. OpenGL的投影分透视投影和正交投影2种,由于透视投影会引起目标模型的变形,在GRECO中只能使用正交投影. 正交投影函数定义了一个成直角的平行六面体,所有在六面体之外的模型都将被裁减掉,不予显示. 因此可以通过设置正交投影函数的参数,分多次将目标在屏幕上显示出来,每次只显示目标的一部分,其它的部分由于被裁剪掉而不会被计算. 最后将几次计算的结果叠加即可得到目标的RCS. 这样通过分屏显示增大了GRECO使用的分辨率,使目标更精确地显示出来,从而提高RCS的计算精度. 分辨率提高后,目标模型的剖分情况也发生了变化,例如分4次显示时,原来在显示器上占据2×2个像素的单元现占据4×4个像素,为了提高目标模型的拟和精度,显然有必要对目标的造型文件进行更细致的剖分,这部分工作可由Rhino很方便地完成.

在光栅化的过程中,程序的运算时间与目标造型文件的剖分细致程度成正比;在运用物理光学/等效电磁流方法计算RCS时,程序的运行时间与目标占据像素的数量成正比. 虽然分屏显示和对目标模型进行更细致地剖分提高了预估结果的精度,扩大了GRECO应用的对象,但是这2项措施都大大增加了程序的运行的时间,使GRECO失去了其运算速度快的优势.

为了提高运算速度,本文采用了OpenGL的显示列表技术. 显示列表是指存储起来用于稍后执行的一组OpenGL命令[11]. 引用显示列表时,按顺序执行其中的OpenGL命令,这些命令都是经过编译的,从而大大提高了执行效率. 以OpenGL中的旋转命令为例,由于生成旋转矩阵的计算量很大,包括对矩阵求逆、平方根和三角函数运算等,耗时较长. 但若采用显示列表技术,则只存储最后的旋转矩阵,运算速度很快. 在GRECO中,目标图像的显示占用了大量的时间,为此可在第1次显示目标图像的同时生成目标图像的显示列表,以后每次显示时,在设置好相应的旋转角度后,可直接调用先前生成的显示列表. 同样对于光照和材质属性等较为耗时的部分也可建立相应的显示列表. 经测试,采用显示列表技术后,在一个姿态角下显示目标、对目标进行光照以及计算目标RCS的时间由十几秒钟(视目标占据的像素数量而定)缩短到3 s左右.

3 计算结果可视化

对目标的RCS进行预估的最终目的是分析和改进其散射特性,将结果反馈给设计. 因此将计算结果以直观的形式反映出来,对RCS计算结果的分析有重要的意义. 正如式(1)所述,GRECO是以像素为面元进行计算的,但在通常情况下由于每个像素代表的实际面积是不同的,因此要将面积的因素考虑进去,为此将$\bar{\sigma}=\sigma_{像素}/s$作为衡量每个像素所代表面元RCS,其中$s=w\times l$,为每个像素代表实际面元面积. 从式(1)中容易得出对于单个像素,当$\xi=0$,即雷达波垂直于像素所代表面元时,有$l=w=a$,$s=a^2$,其中a为每个像素的宽度,则

$$\bar{\sigma}' = \frac{4\pi a^2}{\lambda^2} \tag{4}$$

在 λ 固定的情况下,对同一目标而言 $\bar{\sigma}'$ 为定值,且容易证明该值为 $\bar{\sigma}$ 的最大值. 用 $\bar{\sigma}'$ 对每个像素的 $\bar{\sigma}$ 进行单位化后分别赋给该像素的颜色分量 (R,G,B),这样就把每个像素物理光学法的预估结果以灰度的形式表现出来.

4　计算实例与分析

图 1 为某假想飞行器单屏显示的预估结果与面元法计算结果的比较,此时分辨率为 700×700. 可见对于尺寸很大的复杂目标,单屏显示的预估结果精度较差,尤其是在峰值处二者相差接近 10 dB.

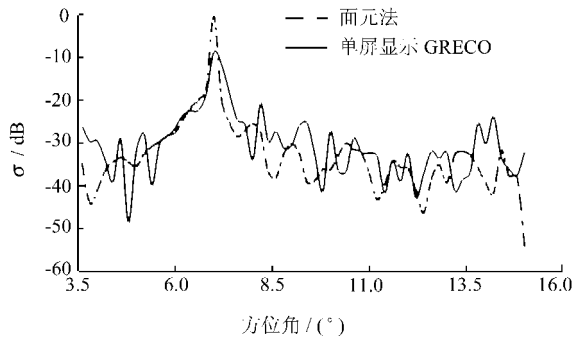

图 1　单屏显示与面元法计算比较(波长 0.1 m,HH 极化)

图 2 为分屏显示的预估结果与面元法计算结果的比较,将目标分为 4 块,单屏分辨率为 700×700,因而总分辨率为 1 400×1 400. 从图中可以看出分屏显示的计算结果精度得到了很大提高,与面元法的计算结果吻合的较好. 尤其在峰值附近二者几乎重合.

图 3 ~ 图 5 为某假想飞行器全机 RCS 的 GRECO 分屏显示计算结果和面元法计算结果,雷达波长 $\lambda = 0.1$ m,水平极化,分屏显示的分辨率为 1 400×1 400.

从图中可看出单屏显示的 RCS 结果与面元法的计算结果相差较多,而分屏显示的 RCS 结果则与面元法的结果较为吻合.

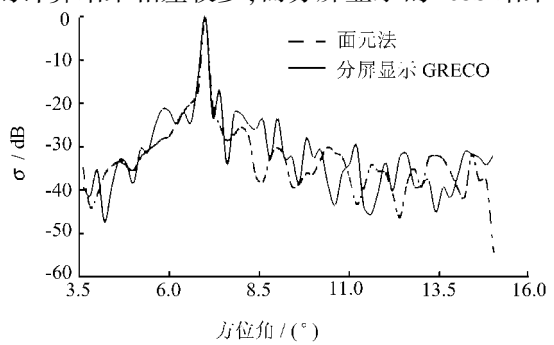

图 2　分屏显示与面元法计算比较(波长 0.1 m,HH 极化)

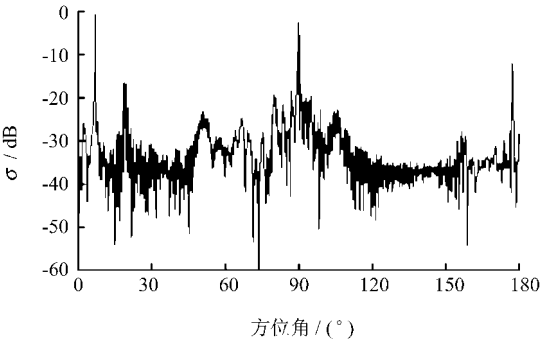

图 3　某飞行器 RCS 面元法结果(波长 0.1 m,HH 极化)

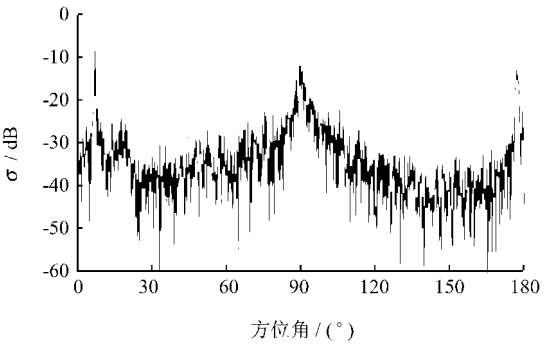

图 4　某飞行器 GRECO 单屏计算(波长 0.1 m,HH 极化)

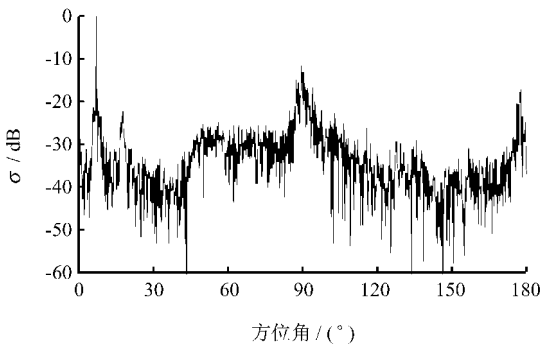

图 5　某飞行器 GRECO 分屏计算(波长 0.1 m,HH 极化)

在 10°附近,主要散射源为机翼前缘,在单屏显示的时候,由于飞行器的尺寸较大,每个像素代表的实际尺寸也较大,不能满足面元尺寸远小于波长的条件,因此 RCS 计算结果与面元法相差较多. 在分屏显示的时候,每个像素代表的面元面积单屏显示的 1/4(此算例中目标分 4 次显示),上述情况得到了改善,故计算结果与面元法较为接近. 在 90°时,散射源主要为机身和翼尖平面,情况也与 10°时类似.

在接近 180°的散射源为机翼后缘,可以看到单屏显示的结果与分屏显示的结果都不理想. 由于该机机翼后缘的宽度沿翼根到翼尖方向逐渐递减,虽然经过分屏处理,翼根部分机翼后缘的显示情况得到了改善,但受机翼形状的影响,此时的

RCS 贡献主要来自于靠近翼尖部分的机翼后缘. 这部分机翼后缘的尺寸仅为整个飞行器最大尺寸的几千分之一到万分之一,因此即使是用分屏显示的方式也不能将其全部正确地显示出来. 从图中可看出单屏显示时的计算结果和面元法更接近,这主要是由于 OpenGL 对尺寸极小部分的显示具有不确定性造成的.

图 6 为某飞行器的散射源预估结果,从图中可以清楚地看到它在此姿态下强散射源的位置.

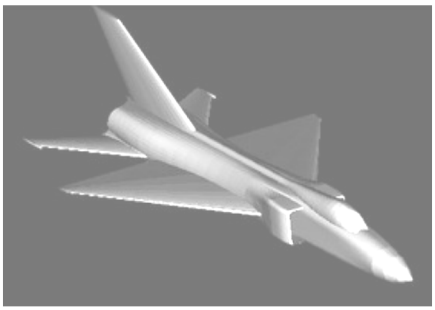

图 6 某飞行器散射源预估结果

5 结 束 语

本文实现了 GRECO 的分屏显示,改进后对大尺寸复杂目标的 RCS 计算的精度有了显著的提高. 通过某飞行器的 RCS 预估结果与面元法的计算结果相比较,两者吻合得较好,具有较好的工程应用价值. 某复杂外形飞行器旋转一周时(0.2° 角度间隔)RCS 的计算时间由原来约 5.9 h 缩短到约1 h(单屏显示)和 3 h(分 4 屏显示),速度大大提高. 在 GRECO 的计算结果的基础上实现了目标散射源的可视化,便于分析目标的强散射源,为进一步的隐身设计提供依据.

参考文献 (**References**)

[1] Rius M, Rerrando M, Jofre L. GRECO: graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1993, 35(2):7 ~ 13

[2] Asvests J S. The physical-optics integral and computer graphics [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1995, AP 43(12): 1659 ~ 1660

[3] Domingo M. Computation of the RCS of complex bodies modeled using NURBS surfaces[J]. IEEE Magazine, 1995, 37(6):36 ~ 47

[4] 李民权,吴先良. 复杂目标 RCS 可视化电磁计算方法的改进[J]. 合肥工业大学学报,2003,26(2):246 ~ 249
Li Minquan, Wu Xianliang. Improvement in the method for the RCS graphical electromagnetic computation of the complex target [J]. Journal of HEFEI University of Technology, 2003, 26(2): 246 ~ 249(in Chinese)

[5] 严靖峰,徐鹏根. RCS 预估中图形电磁学方法的改进[J]. 电波科学学报,1998,13(3):313 ~ 317
Yan Jingfeng, Xu Penggen. Improved methods for graphical electromagnetic computing in RCS prediction[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998, 13(3):313 ~ 317(in Chinese)

[6] 高 鹰,宁焕生,王宝发. 基于 Windows NT 的复杂目标 GRECO 建模[J]. 系统工程与电子技术,1999,21(2):9 ~ 13
Gao Ying, Ning Huansheng, Wang Baofa. GRECO fitting of complex targets based on windows NT system[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(2):9 ~ 13(in Chinese)

[7] 郭 晖,龚书喜,赵维江,等. 基于 NURBS 建模和渐近物理光学的 RCS 计算研究[J]. 现代电子技术,2002,142(11):13 ~ 16
Guo Hui, Gong Shuxi, Zhao Weijiang, *et al*. On RCS computation using asymptotic PO with surface modeled by NURBS[J]. Modern Electronics Technology, 2002, 142(11): 13 ~ 16(in Chinese)

[8] 李修懿,宁 涛,席 平. 飞行器 RCS 预估计算前置处理的曲面元方法[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(13):254 ~ 257
Li Xiuyi, Ning Tao, Xi Ping. Technique based on surface element of prepositive disposal in predicting RCS of aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(13):254 ~ 257(in Chinese)

[9] 叶国鹏,张云飞. 基于 IGES 文件输入的图形电磁计算方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,30(2):100 ~ 104
Ye Guopeng, Zhang Yunfei. Graphical electromagnetic computing method research based on IGES files import[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 30(2):100 ~ 104(in Chinese)

[10] 北京洪恩教育科技有限公司. 犀牛 Rhino 3 产品模型设计[M]. 天津:天津电子出版社,2004
Beijing Human Education Technology Co Ltd. Rhino 3 product model design[M]. Tianjin: Tianjin Electronics Press, 2004(in Chinese)

[11] Board R, Neider J, Davis T, *et al*. OpenGL programming guide: the official guide to learning OpenGL, release 1[M]. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1993