

基于图形硬件的快速 RCS 估算

汪 华 林 海 鲍虎军

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 为了对复杂目标模型进行快速估算,在介绍复杂目标的 RCS 计算系统 emX 及其所采用的物理光学方法、几何光学寻迹方法和物理绕射方法的基础上,结合图形硬件对估算进行了加速,实现了对于复杂目标模型的一次反射,多次散射和边缘绕射相结合的快速 RCS 计算算法。最后对实验数据进行了对比和分析,结果证明,该方法是一种有效的 RCS 快速估算方法。

关键词 雷达散射截面 物理光学 图形硬件

中图分类号: TP391.72 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)09-1101-06

Rapid RCS Prediction Using Graphic Hardware

WANG Hua, LIN Hai, BAO Hu-jun

(Zhejiang University CAD&CG State Key Laboratory, Hangzhou 310027)

Abstract This paper introduce a rapid RCS prediction system emX for complex targets using physical optics, geometry optics, physical theory of diffraction and graphic hardware. This paper focused on the RCS computation of electrically large, complex and perfectly targets. The faceting approach is used to model the target's geometry. This paper uses the close form solution of physical optics and the graphic hardware to accelerate RCS computation. The results show that this method is an efficient RCS rapid prediction method.

Keywords radar cross section(RCS) prediction, physical optics(PO), graphic hardware

1 引 言

雷达散射截面(radar cross section, RCS)计算在国防上有着广泛应用,追求更低的 RCS 是军事目标设计的要点之一。大家知道,复杂目标通常采用低频数值方法或高频近似方法求解,但当目标尺寸超过 100λ (λ 表示入射电磁波波长)时,由于使用低频方法常因计算时间或存储容量等原因而无法求解^[1],因而高频方法是大尺寸目标 RCS 求解的惟一方法^[2]。

高频方法近似认为高频电磁波的传播和散射具有以下“局部特征”:电磁场局部表现为平面场特征,同时给定观察点的领域内的场只取决于该表面的某一部分,即感应电流的菲涅尔区;同时高频方法认

为,对于复杂物体可以先将其分成几类表面散射源,然后通过对几部分的分别计算,最后相位相加即得到总散射场。表面散射源包括有镜面反射、边缘散射、多次反射、表面爬行波和尖顶绕射等,其中由于表面爬行波和尖顶绕射衰减较快,因此实际计算中可以忽略^[3]。

物理光学(physical optics, PO)方法是高频估算方法的一种,该方法是首先通过计算入射电磁场在物体表面产生的感应电流,然后由感应电流产生散射电磁场,从而得出 RCS 贡献。物理光学方法认为,由于感应电流只产生于入射电磁场的照射面,因此通过对照射面产生的感应电流进行积分,即可计算最终散射场,而通过对面积分的变换,物理光学方法通常可以转化成一维的线积分,可见物理光学方法在计算速度上有很大的优势。

大家知道,准确的 RCS 目标模型构建一直是 RCS 计算中的另一研究问题。早先的电磁计算是使用基于几何要素的体素拼合方法来构建模型,其虽具有简单快速的特点,但是模型表达能力有限,不仅无法表示复杂模型,而且处理物体遮挡关系也相对复杂。参数曲面模型,特别是 NURBS(non-uniform rational B-spline surface)是常用的目标建模方法,参数曲面虽能逼真地拟合目标模型,但也存在表示复杂,特别在应用于物理光学方法时,由于无法变换成一维的线积分,因而需要使用驻相法等复杂数值方法求解^[4]。基于面片的模型表示方法是电磁计算中另一常用的建模方法,它通过一定数量的面片,能比较逼真地表示原始模型,由于面片模型表示比较简单,特别物理光学方法可以在面片上变换成一维的线积分形式,同时可通过图形硬件的方法来大大提高面片的相互遮挡、消影等处理速度,因此可提高计算速度。

Youseff 最早提出了使用平坦的平面多边形来表示目标模型和使用物理光学来计算目标物体的 RCS 方法^[5]。Klement 通过实验比对提出,在用平坦多边形表示的模型和原始的模型的误差小于 $1/16\lambda$ 条件下,物理光学方法的计算结果是精确的^[6]。

Griesser 等分析比较了物理光学方法数值积分处理反射场和几何光学寻迹方法处理反射场的两种方法,虽然前一方法较后一方法精确,但前一方法计算量远比后一方法大,并且随着目标尺寸的增大,两种方法的精度上的差别将明显变小。业已经证明,对于大尺寸的目标物体,使用几何光学寻迹方法处理反射场能够保证计算精度^[7]。

由于物理光学法假定目标处于阴影部分的表面电流严格等于零,易造成人为地引入表面电流不连续性,因此随着散射方向离开镜面反射方向越远,物理光学法计算结果的误差越大。物理绕射方法(PTD; physical theory of diffraction)是通过边缘进行绕射计算来对物理光学方法进行修正,但物理绕射法只能适用于 Keller 锥内的方向。Mitzner 等提出了增量长度绕射系数(ILDC; incremental length diffraction coefficients)方法^[8],即通过对等效电磁流系数中减去了表面光学项,先获得增量长度绕射系数,再把物理绕射方法推广到 Keller 锥以外的方向,这样就消除了等效电流系数方法产生的奇点。

本文使用三角面表示模型的表示方法,同时采

用物理光学、几何光学寻迹、增量长度绕射系数等电磁计算方法,结合图形硬件的方法设计并实现了一套复杂目标模型的高频 RCS 估算软件 emX(图 1)。本文首先介绍了电磁快速计算的相关研究,并着重对物理光学/几何寻迹方法、图形硬件加速方法进行了描述,最后给出了计算结果和分析。

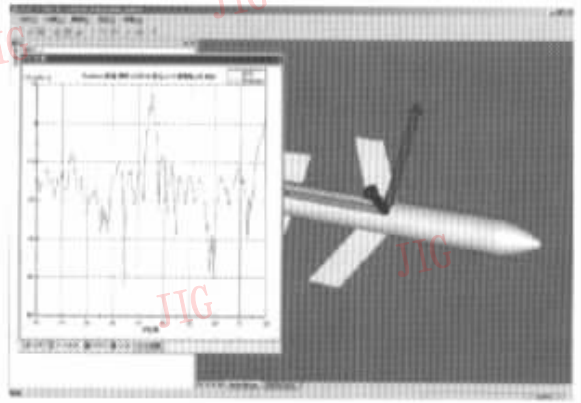


图 1 高频 RCS 估算软件 emX

2 RCS 高频估算方法相关研究

RCS 高频估算方法中的物理光学方法和几何光学寻迹方法是适用范围广、计算精度较高的方法之一,其他的高频估算方法还包括几何光学方法^[3]、图形电磁计算^[9]、弹跳射线方法^[10]等方法。

其中几何光学方法应用高频电磁波按光线传播的原理,首先使用若干射线管来表示入射电磁场,然后通过多次光线跟踪的方法求得最终散射贡献。对于复杂物体,由于需要划分密集的射线管才能取得精确的结果,因此往往需要较长的计算时间。同时,由于射线管是焦散的,在其焦点处几何光学方法是失效的,因而限制了几何光学方法的应用。

弹跳射线方法是几何光学方法和物理光学方法的综合方法。弹跳射线方法通常对腔体计算,即先通过在腔体口虚拟等效平面;然后在等效面上划分密集的四边形射线管,再通过对射线管的 4 个角点进行射线跟踪,经过若干次反射后,即可在等效平面上获取反射射线管截面;最后通过物理光学方法对反射射线管截面进行积分来计算最终 RCS 贡献。大家知道,弹跳射线法实质是物理光学方法,它是通过对射线管角点的光线跟踪来简化物理光学计算中的多次反射计算。研究表明,弹跳射线方法对凹腔体比较有效,但当腔体内存在风扇等面片时,由于其只对射

线管四角点进行跟踪,因此会造成射线管的分裂,使弹跳射线方法失效。

图形电磁计算是一种单站散射估算方法,它首先使用的物理光学方法中的感应电流为 $J = 2\mathbf{n} \times \mathbf{h}$, 并运用图形硬件处理模型的遮挡和消影,然后通过像素颜色表示该像素面片的法向来对所有像素求和处理,以取得最终的 RCS 贡献。在电磁图形方法计算中,由于目标模型转换成一个个的像素,因此对边缘识别困难,而且只适合单站散射情况。

物理光学方法和几何光学寻迹方法采用平坦多边形模型可以降低物理光学积分运算,而对于复杂物体,由于需要使用较多面片进行模型表示,因此入射电磁波照明面的确定和反射电磁波与面片的求交约束了物理光学和几何光学寻迹方法的计算速度。本文采用图形硬件中硬件集成算法来完成消影和遮挡的处理,从而提高了 RCS 估算的速度。

3 基于硬件加速的计算

3.1 物理光学和增量长度绕射系数

物理光学认为,电磁波入射到目标物体表面会产生感应电流,而感应电流又会产生散射场,进而产生 RCS 贡献。众所周知,通过电磁场理论中基础的麦克斯韦方程组就可以推导出感应散射场的解析形式,这个形式就是斯特拉顿方程(式1),而通过平坦多边形的模型表示方法,则可以将斯特拉顿方程由面积分转换为多边形的围线积分,以实现电磁 RCS 中物理光学方法快速计算。

由于物理光学严格认为在阴影区内面片感应电流为零,因此需要采用绕射方法进行修正。增量长度绕射系数方法认为绕射场等于总场中减去光学场,不仅可以将物理绕射理论推广到 Keller 锥以外的方向,同时可以将等效电流系数中的奇点和物理光学项的奇点相抵消。斯特拉顿方程为

$$\mathbf{H}_{\text{scattering}} = - \iint_s [\mathbf{j}\omega\epsilon(\mathbf{n} \times \mathbf{E})\psi - (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \times \psi - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}) \nabla \psi] ds \quad (1)$$

其中, $\mathbf{H}_{\text{scattering}}$ 为电磁波远场散射磁场, \mathbf{n} 表示表面单位法向, \mathbf{E} 表示表面电场, \mathbf{H} 表示表面磁场, ψ 表示格林函数, ω 为电磁波角速度, ϵ 为自由空间中的介电常数, s 为积分面积。

斯特拉顿方程(式(1))是一个面积分,由于其形式相对复杂,无法直接作为快速计算方程,因此该方

程需要按目标模型做相应简化。

由于本文是计算远区场的 RCS,因此在位置矢量 $\hat{\mathbf{r}}$ 处的电磁波可以表示为平面场 $\mathbf{H}_{\text{incide}} = \mathbf{h}_{\text{incide}} \times H_0 e^{-j\mathbf{k}l \cdot \hat{\mathbf{r}}}$ 的形式,其中, H_0 表示入射磁场的强度, $\mathbf{h}_{\text{incide}}$ 表示入射磁场极化方向, \mathbf{i} 表示电磁波入射方向。

这样,斯特拉顿方程可以简化为

$$\mathbf{H}_{\text{scattering}} = \frac{-j\mathbf{k}H_0 e^{j\mathbf{k}l}}{2\pi l} \iint_s [\mathbf{s} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{h}_{\text{incide}})] \times e^{j\mathbf{k}r \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{s})} ds \quad (2)$$

其中, l 为电磁波散射接收点远场距离, \mathbf{s} 表示电磁波散射接收方向。

由于目标模型是由平坦多面形组成的,注意到积分项 $\mathbf{s} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{h}_{\text{incide}})$ 在面片内是一定值,而且可将 $\mathbf{s} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{h}_{\text{incide}})$ 提出在积分公式外,同时由于对面积分应用格林公式可将面积分转换成围线积分,因此斯特拉顿方程最终可以表示为如下对多边形各边进行求和的公式:

$$\mathbf{H}_{\text{scattering}} = \frac{H_0 [\mathbf{s} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{h}_{\text{incide}})]}{2\pi l T^2} e^{-j\mathbf{k}l} \sum_{n=1}^N (\mathbf{p} \cdot \mathbf{a}_n) \times e^{j\mathbf{k}r_n^0 \cdot \mathbf{W}} \frac{\sin\left(\frac{1}{2}k\mathbf{a}_n \cdot \mathbf{W}\right)}{\frac{1}{2}k\mathbf{a}_n \cdot \mathbf{W}} \quad (3)$$

其中, \mathbf{r}_n^0 为面片内第 n 条边中点的位置矢量, \mathbf{a}_n 表示面片内第 n 条边矢量, $\mathbf{W} = \mathbf{i} - \mathbf{s}$, $\mathbf{p} = \mathbf{W} \times \mathbf{n}$ 。

由于公式(3)将公式(1)的面积分转换成对多边形的围线积分,简化了积分运算,从而提高了物理光学方法的计算速度。

增量长度绕射系数方法使用并矢绕射系数 $\bar{\mathbf{d}}$ 来对入射电场的照明边缘进行积分,以确定其绕射场

$$\mathbf{E}_{\text{diffraction}} dt = \mathbf{E}_{\text{incide}} \frac{e^{j(kR - \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2\pi R}} \bar{\mathbf{d}} \cdot \mathbf{e}_{\text{incide}} dt$$

其中, $\mathbf{E}_{\text{diffraction}}$ 为绕射场, $\mathbf{E}_{\text{incide}}$ 为入射电场, t 为边缘单位, $\bar{\mathbf{d}}$ 为并矢绕射系数, R 为离运场发射源距离, $\mathbf{e}_{\text{incide}}$ 为入射电场极化方向。

3.2 图形硬件快速计算

确定入射电磁波的照明面片和反射电磁波的照明面片是物理光学方法/几何光学寻迹方法快速计算 RCS 的关键。而通过图形学中的硬件方法,可以明显提高这一计算过程。

Klement 提出的物理光学方法要求目标模型在和原始模型误差不超过 $1/16\lambda$, 而这样复杂的模型则需要相当数量的三角面片表示,这就造成确定电磁波照射面及反射求交计算的困难。

深度缓存方法可通过图形硬件方法来加快计算,因为采用深度缓存和通过深度剔除方法,能快速完成复杂模型的遮挡和消影处理,以确定电磁波照射面片。

整个 RCS 估算系统可以分为以下步骤:

(1) 使用图形硬件方法来确定一次入射的所有照明面片。

根据电磁计算的技术背景,本文采用后向面判别和深度缓存方法相结合的方法来处理。由于远场电磁波可以近似为平面波,因此其可采用图形学的平行投影方式。若使用图形硬件来完成遮挡和消影操作,则只需要采用 Flat 的光照模型。本文采用面片和颜色一一对应的方式,将面片通过颜色表示在屏幕上,然后通过判断屏幕上各像素的颜色来确定对应面片为可见面片。对于复杂模型,在进行绘制的时候,如果绘制的视区太小,则会产生若干面片相互重叠在若干像素点内显示的情况,这将对计算精度产生比较大的影响。本文根据投影平面内面片数目和视区的大小来确定合适的投影平面大小和划分方法,从而保证了每个面片都能完整地在投影面上绘制处理。

具体的算法为:

- ① 设置平行投影模式
- ② 遍历每一面片
 - 1) 使用后向面片来剔除不可见面片
 - 2) 将其他面片颜色设置成 F(Faceid)
- ③ 以 Flat 方式绘制面片
- ④ 根据模型的尺寸动态划分 Viewport 大小
- ⑤ 遍历每个 Viewport
 - 1) 使用像素颜色确定面片 id, $id = F'(\text{pixel color})$
 - 2) 确定该 id 的面片为可见面片

(2) 计算一次照明面片上的散射场。

使用物理光学方法计算一次照明面的散射场,即使用基于面片的物理光学积分公式(式 3)进行计算。

(3) 使用几何光学方法确定其反射电磁场的场强。

几何光学方法首先将入射电磁波分解为 E 波和 H 波,并分别计算其反射场,再叠加成整体反射场。

$$\begin{bmatrix} E_{\text{reflect}}^{\parallel} \\ E_{\text{reflect}}^{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{incide}}^{\parallel} \\ E_{\text{incide}}^{\perp} \end{bmatrix} e^{-jk_{\text{reflect}}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} E_{\text{incide}} = E_{\text{incide}}^{\parallel} \mathbf{e}_{\text{incide}}^{\parallel} + E_{\text{incide}}^{\perp} \mathbf{e}_{\text{incide}}^{\perp} \\ E_{\text{reflect}} = E_{\text{reflect}}^{\parallel} \mathbf{e}_{\text{reflect}}^{\parallel} + E_{\text{reflect}}^{\perp} \mathbf{e}_{\text{reflect}}^{\perp} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{e}_{\text{incide}}^{\parallel}$ 和 $\mathbf{e}_{\text{incide}}^{\perp}$ 分别表示入射平面内电磁波的 E 波方向和 H 波方向, $\mathbf{e}_{\text{reflect}}^{\parallel}$ 和 $\mathbf{e}_{\text{reflect}}^{\perp}$ 分别表示反射平面

内电磁波的 E 波方向和 H 波方向, s_{reflect} 为两个反射点之间的距离。

(4) 通过几何光学寻迹法寻找反射照明面,并进行反射计算

几何光学寻迹法认为反射电磁波主要集中于面片的镜面反射部分,其中对于三角面片模型,某面片的反射电磁波则集中在其反射三棱柱内,而通过对反射三棱柱内的照明面片进行物理光学方法积分计算,即可以得到电磁反射的 RCS 贡献。本文使用几何光学寻迹方法处理反射,即首先将该反射三棱柱内的面片进行一定程度的细分,然后对每一细分的面片通过上述硬件方法确定其二次反射所照射的面片,这样即可通过动态细分反射面片来提高反射求交精度,本文方法是根据面片的大小对反射面片进行动态划分,对于比较大的面片,需要进行较细的面片划分,而对于比较细小的面片,则进行相对粗的划分,以便能在保证计算精度的条件下加快计算速度。

具体算法为:

- ① 设置平行投影模式
- ② 绘制模型,根据面片 ID,确定面片颜色
- ③ 对每一块反射面片
 - 1) 根据反射面片确定投影矩阵
 - 2) 将反射三角面片划分成若干个小三角面片
 - 3) 对每一小三角面片,确定其在被照射面上的投影三角形
 - 4) 对所有的投影面片进行物理光学积分计算
- ④ 递归进行下一层反射计算

4 计算结果及分析

为了验证本文方法的效果,选择了几个经典模型用本文方法与 Radbase 软件进行了 RCS 曲线的计算,计算结果见图 2~图 5。

横坐标表示入射角度,纵坐标表示 RCS(单位为 dbsm)。

本文对二面角和平板绕射情况进行了计算,并将计算结果与商业软件 Radbase 计算结果进行了比较,结果比较一致,说明本文方法在处理 RCS 一次反射、多次散射、绕射等情况是相当有效的。

对于复杂模型的计算,本文方法和软件 Radbase 的计算结果也基本吻合。本文方法的最大优点在计算时间不随着目标模型复杂度线性增加,表 1 给出了 3 种不同复杂情况的模型的对比结果。

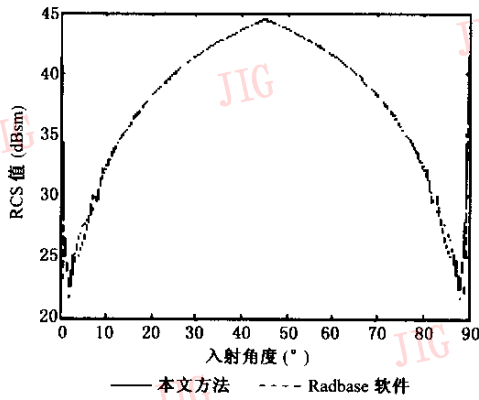


图 2 二面角模型(10GHz, VV 极化)

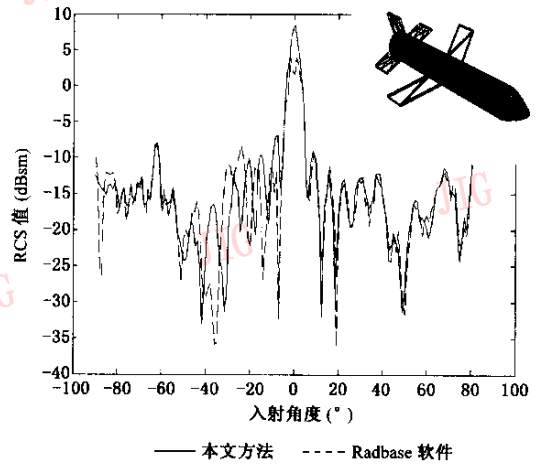


图 5 Missile 模型(12GHz, VV 极化)

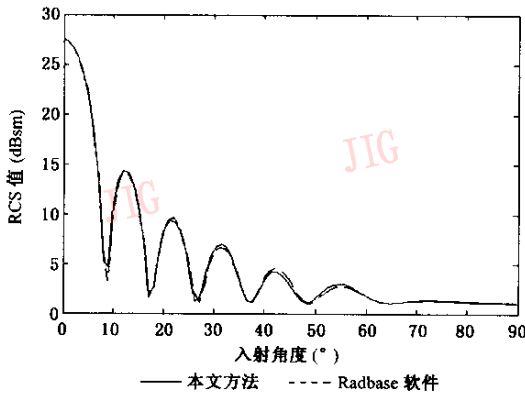


图 3 带边缘绕射的平板模型(0.5GHz, VV 极化)

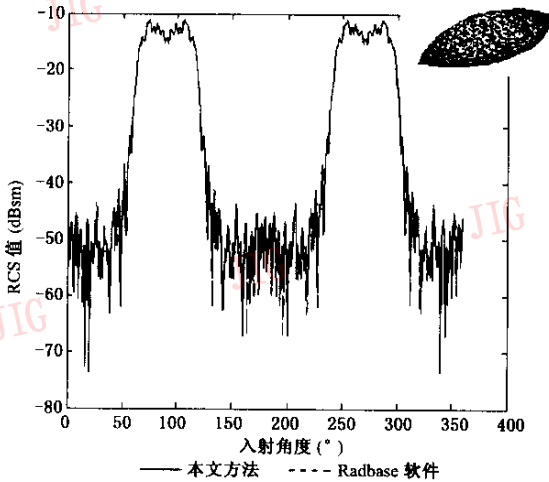


图 4 杏仁核模型(10GHz, VV 极化)

从表 1 可以看出,由于图形硬件方法速度只取决于帧缓存的大小,与目标模型的复杂度没有相应的联系,因此对于复杂目标,使用图形硬件方法能明显提高计算速度。

参 考 文 献

- 1 Tyson M. High-frequency electromagnetic techniques and advances[M]. Washington, DC, USA, University of Washington press, 1995.
- 2 Gordon W B. Frequency dependence of radar backs-catter from rain[A]. In: Antennas and Propagation Society International Symposium[C], Washington, DC, USA, 1977, 15:503~504.
- 3 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985, 11.
- 4 郭辉. 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, (11):13~16.
- 5 Youseef Nazih N. Radar cross section of complex targets[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(5): 722~734.
- 6 Kelment Dieter, Preissner Jürgen, Stein Volker. Special problems in applying the physical optics method for backscatter computations of complicated objects[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(2):228~237.
- 7 Griesser Timothy, Balanis Constatine A. Backscatter analysis of dihedral corner reflectors using physical optical theory of diffraction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(10): 1137~1147.
- 8 Knott Eugene F. The relationship between Mitzner's ILDC and Michaeli's equivalent currents [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, 33(1): 112~114.
- 9 Rius Juan M, Ferrando Miguel, Jofre Luis. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(9):1308~1319.
- 10 Ling Hao, Chou Ri-Chee, Lee Shuang-wu. Shooting and

表 1 复杂模型计算对比

(平台:P4 1.6G/256M/Windows 2000)

模型名称	三角面数目	采样数目	Radbase 计算时间(s)	本文方法计算时间(s)
金属球	20000	180	990	30
某坦克模型	1904	180	40	10
Naca3317 模型	524	180	4	4

bouncing rays calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37 (2):197~205.

汪华 1977年生,1999年获得浙江大学学士学位,现为浙江大学计算机学院硕士研究生,研究方向为几何造型、科学计算可视化。

E-mail:wanghua@cad.zju.edu.cn

林海 1965年生,副研究员,2000年获得浙江大学博士学位。目前主要从事科学计算可视化、Web技术、虚拟现实方面的研究。

E-mail:lin@cad.zju.edu.cn

鲍虎军 1966年生,研究员,1993年获得浙江大学博士学位。研究方向计算机图形学、虚拟现实和数字几何理论等方面的研究。目前为浙江大学CAD&CG国家重点实验室主任,兼任“十五”863信息领域信息获取与处理主题专家组成员和国家自然科学基金计算机学科评审组成员、计算机学会虚拟现实与可视化专业委员会委员、清华大学CAD国家工程中心学术委员会委员、《计算机辅助设计与图形学学报》编委。

E-mail:bao@cad.zju.edu.cn