

文章编号:1000-6893(2007)03-0610-05

预追踪法在搭建 RCS 计算平台中的应用

黄敏杰¹, 李 葳², 武 哲¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

Application of Pre-tracing Technology in Building of RCS Calculation Platform

HUANG Min-jie¹, LI Wei², WU Zhe¹

(1. School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University

of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

摘 要: 介绍综合不同 RCS 贡献机理的计算平台的搭建方法。针对射线追踪法的计算量是这类 RCS 计算平台计算效率的瓶颈这一现状, 提出仅对多次散射区采用射线追踪计算来减小计算量的方法。给出一种通过粗略的射线追踪来确定多次散射区的方法, 并用该方法获得任意目标的散射分布图。对预追踪法在 RCS 平台的搭建中的应用方式进行探讨, 并预测效果。通过具体的计算实例验证预追踪法的效果, 并给出几类典型目标的多次散射区比例系数, 可供采用预追踪法时参考。计算结果表明, 在不改变计算精度的条件下, 预追踪法可以将 RCS 计算平台中射线追踪部分的计算量减少到原来的 1/3 以下。对散射分布的可能应用做出展望, 可以作为后续工作的指导。

关键词: 雷达散射截面; 电磁散射; 耦合散射; 射线追踪; 预追踪

中图分类号: V218 **文献标识码:** A

Abstract: The building of RCS calculation platform which includes many different RCS mechanisms is introduced. Considering that the huge computation of ray tracing is the bottleneck of the efficiency of the RCS calculation platform, a method for reducing the computation of ray tracing is given, which suggested the calculation of the coupling scattering areas only. The authors conduct a rough ray tracing before really tracing to identify the coupling scattering areas, and obtain some scattering distribution maps of arbitrary targets using this method. The ways to use the pre-tracing method efficiently in the RCS calculation platform are discussed, and the effects are predicted. The typical effect is improved through some calculation examples, and the coupling scattering area ratio of some typical targets is concluded, which is useful for the application of pre-tracing method. The results show that this pre-tracing method can reduce the computational cost of RT part to less than 1/3 of the original. The possible application of pre-tracing method in other way is mentioned also, which can be the direction of future.

Key words: radar cross section; electromagnentic scattering; coupling-scattering; ray tracing; pre-tracing

为了充分考虑各种散射机理的贡献, 在高频区雷达散射截面(RCS)的计算中通常需要综合几种计算方法。一种典型的组合是: 物理光学法(PO) + 几何绕射理论(GTD) + 射线追踪法(RT)。这种综合计算方式中, 用 PO 法计算一次散射的贡献, GTD 计算棱边绕射的贡献, RT 计算多次耦合散射的贡献^[1,2]。如果遮挡问题解决适当, PO 法和 GTD 的处理速度是极快的, 并且有很高的准确性。但是为了获得足够的精度, RT 的计算量将十分巨大, 这常常使得 RT 法的计算效率成为 RCS 综合计算平台搭建的瓶颈^[3]。

大量的计算实例表明, 普通目标表面对电磁场发生多次耦合散射的仅仅是一小部分区域。因此, RCS 综合计算平台的搭建过程中, 可以对 RT 法的应用区域做适当的调整, 以减小 RT 法的计算量。例如, 可以只对多次散射发生的区域采用 RT 法计算, 其他区域用 PO 法计算一次散射已经足够了。如图 1, 如果多次散射的区域沿入射电磁波方向的投影面积为 S , 通常 RT 法的射线管划分区域的面积为 S_0 , 则可以将 RT 法的计算量减缩到原来的 $\eta = S/S_0$ 倍左右。

文献[4]在用 RT 计算城市通讯中的电磁场时, 曾提到采用“试追踪(test ray)”的方法来确定由源点到接收点的传播路径; 文献[5]也采用了

收稿日期: 2006-04-21; 修订日期: 2006-06-27

通讯作者: 黄敏杰 E-mail: huangminjiebuaa@163.com

“采样射线管”追踪的方法来减小精密追踪的射线管的数目,文中称这种方法为“口面优化”,该方法通过“采样射线管”的追踪,将精密射线管的划分区域由图 1 中的 S_0 减小为目标投影面积 S_1 。根据这些启发,本文将介绍一种多次散射区的确定方法,并对 RT 在多次散射区上的应用以及与其他方法的结合做详细的讨论。

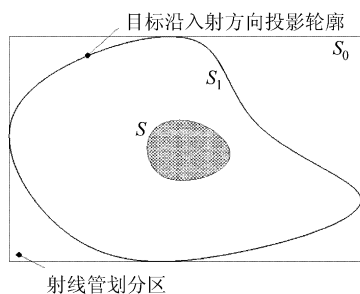


图 1 预追踪法示意图

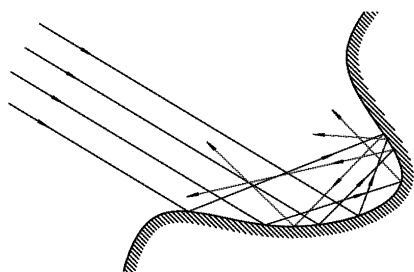
Fig. 1 The sketch map of pre-tracing technique

1 RT 法简介^[1,5]

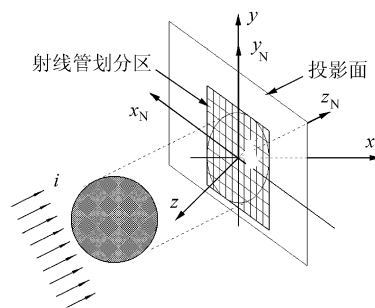
射线追踪法的基本原理是:将入射场划分成一根根沿入射方向的射线管,射线管按照几何光学的传播路径传播,并且假设反/折射前后能量都集中在射线管中不分散。通过追踪单根射线管的传播过程来确定射线管中场能量的散射情况(图 2a)。

射线管的划分通常在垂直于入射方向的面上进行,射线管的划分区也通常就是目标在这个面上投影的包络区(图 2b)。所有射线管的出发点都在这个划分面上,这样可以保证所有射线管出发时的相位相等。

射线追踪的过程也就是计算所有射线管与目标表面的交点和散射路径的过程。在用 RT 法计算 RCS 时,在射线管的散射过程中采用 PO 或 GO(几何光学法),而在最后一次反射时采用 PO 法来计算沿指定方向上的远场散射。



(a) RT 法示意图



(b) 射线管的划分

图 2 射线追踪法原理

Fig. 2 The principle of RT

为了达到足够的精度,RT 法要求射线管的截面尺寸小于入射波长的 $1/10$ 。在求解高频区 RCS 时,这一要求导致射线管的数目十分庞大:典型频率下,特征尺寸为 100λ 量级的目标需要划分 1×10^5 条以上的射线管。并且每条射线管的散射路径计算需要与整个目标进行相交计算和景深比较,计算量是很可观的。

2 多次散射区的确定

多次散射区的确定可以采用多种方法,常用的方法有目标耦合散射区提取等^[2]。目标耦合散射区提取法是一种将目标本身具有明显耦合特征的部件或区域(如内腔、二面角区域等)分离出来单独使用耦合方法计算的方法。该方法对计算量减缩效果比较明显,但其使用受目标形状的限制,且提取过程自动化程度不高。本文介绍一种采用射线追踪确定多次散射区的方法,也就是预追踪法。

预追踪法的基本过程是:在计算前,按照 RT 法的一般步骤,用划分较粗的射线管对目标进行一次射线追踪(预追踪)。与真实追踪不同的是,追踪时仅仅保存射线管的反射信息(根据实际需求保存是否发生多次反射、反射次数或反射路径等信息)甚至只对单条射线管追踪两次散射点。预追踪结束之后,按照射线管划分的参数,将反射路径信息与目标在射线管划分面上投影联系起来,就可以得到沿给定入射方向目标表面的发生耦合反射的状况。

图 3 是用本方法得到的典型目标的散射次数分布图。从图 3 中可以看出,普通目标上发生多次散射的仅仅只是一小部分区域;另外在很多角域内,目标表面几乎没有多次散射的情况发生,也就是说 η 通常是一个很小的值。

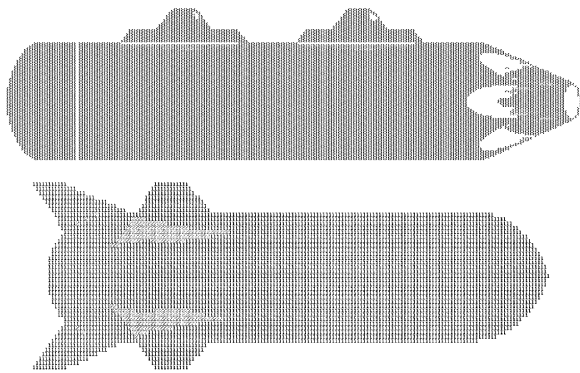


图 3 两个典型目标的散射次数分布图(颜色越深表示该区域反射次数越多)

Fig. 3 Scattering distributions of two typical targets (the lighter of the color, the more reflect counts)

实际上,采用预追踪方法确定的多次散射区并不完全准确:该方法忽略了目标上小于预追踪射线管尺寸的细节部分的多次散射贡献。但从工程意义上看,该方法仍具有较高的精度和可靠性。

3 精密射线管的划分

预追踪法确定的多次散射区是以射线管的形式给出的。在根据发生多次散射的射线管的边界来确定多次散射区时,为了获得较为准确的多次散射区的信息,可以将边界向外移 $1/2$ 个射线管边长,如图 4。这种划分方法可以尽量保证非多次散射区向多次散射区过渡的区域计算的准确性。

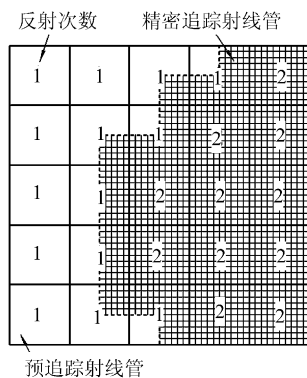


图 4 精密射线管的划分

Fig. 4 The method of arranging the accurate ray tubes

可以将这种划分原则抽象为:将预追踪射线管划分为编号 $0\sim 3$ 的 4 个区,如果相邻的射线管散射次数 > 1 ,则将该射线管相邻(对角也算作相邻)的区作为多次散射区计算。对于非边界(预追踪射线管划分区的边界)射线管,可以将射线管周围的 8 个相邻射线管按图 5 所示按 $0\sim 7$ 编号。如果编号 n

$$n \equiv 0 \pmod{2} \quad (1)$$

则该相邻射线管为对角相邻射线管,它对应的中心射线管的分区编号为 c

$$c = \lfloor n/2 \rfloor \quad (2)$$

如果

$$n \equiv 1 \pmod{2} \quad (3)$$

则该射线管与中心射线管以边相邻,它对应中心射线管的两个分区

$$c_1 = \lfloor n/2 \rfloor, \quad c_2 = \lfloor n/2 \rfloor + 1 \quad (4)$$

如果要根据预追踪的结果来划分不同精密程度的射线管,可以采用上面给出的方法在图 5 所示的 4 个区上单独进行,不存在其他困难。

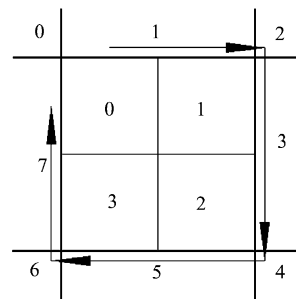


图 5 预追踪射线管分区

Fig. 5 Division of the pre-tracing ray tube into sub-areas

4 精密射线管的计算

精密射线管的计算可以在划分完成后直接进行,并将每条射线管对 RCS 的贡献及时累加到总的 RCS 中,这一过程与一般 RT 一样,不存在其他困难。

5 预追踪法效果的评估

设普通 RT 法射线管的面密度为 e_0 ,预追踪射线管的面密度为 e ,精密 RT 法的射线管面密度与普通 RT 法射线管的面密度相同,普通 RT 法和精密 RT 法单条射线管追踪的平均耗时为 t_0 ,预追踪单条射线管追踪的平均耗时为 t ,则普通射线追踪耗时

$$T_0 = S_0 e_0 t_0 \quad (5)$$

预追踪-精密追踪总耗时

$$T = S_0 e t + S e_0 t_0 \quad (6)$$

二者之比

$$\lambda = \frac{T}{T_0} = \frac{S_0 e t + S e_0 t_0}{S_0 e_0 t_0} = \quad (7)$$

$$\frac{e t + \eta e_0 t_0}{e_0 t_0} = e t / (e_0 t_0) + \eta = \tau + \eta$$

式中: $\tau = e t / (e_0 t_0)$ 为相同面积射线管划分区下预

追踪与普通 RT 法耗时之比;对于特定目标, η , e , t 和 t_0 常常是固定的,而为了满足精度要求, e_0 必须随着入射波长的减小而增大。因此在频率越高,采用预追踪法取得效益越大。通过 η 和 τ 两项的值可以预估采用预追踪法后计算量减缩的收益。

6 与其他 RT 改进技术的结合

如果能在预追踪时记录下射线管的反射次数信息,则还可以对下一步的精密射线追踪的射线管的反射次数起到预测作用;如果普通 RT 法射线管多次反射的平均反射求解次数为 k ,则根据反射次数的预测可以将精密追踪的反射次数求解降低为 $(k-1)$ 次,也就是说,使式(7)中 $t = (1 - 1/k)t_0$ 。

如果预追踪时记录射线管的反射路径信息,则可以与径迹法相结合,简化精密射线追踪的过程;还可以根据反射次数来确定精密射线追踪的射线管划分的精细程度,提高散射路径计算的准确率。目前径迹法最多能将射线追踪的计算量降低到普通追踪方法的 1/3.5 左右,由于这里已经由预追踪法提供了部分参考散射路径,且参考路径的分布更为合理,所以完全可以将精密追踪的计算量降低到更小。与径迹法相结合时,为了充分利用参考路径并节省内存,精密射线管的计算顺序可以按图 6 来进行。

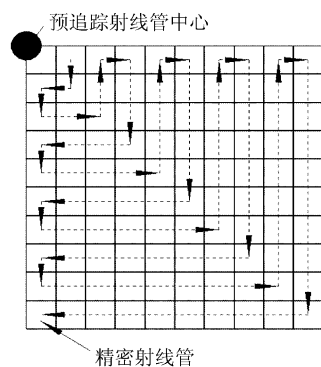


图 6 与径迹法结合

Fig. 6 Pre-tracing technology combined with method of trace

如果预追踪时进一步记录射线管在给定方向上的散射强度,则可以根据散射强度的分布来指导精密追踪射线管的划分,达到智能划分射线管的目的;也可以根据散射强度分布来识别目标上的重要散射源^[6,7]:作为目标的信号识别特征,或指导相应的设计。这部分内容正在研究中。

7 本方法的实际效果

为确定预追踪法对不同类型目标的改善效果,对图 7 所示的几个典型目标进行了预追踪试算。试算时的方位角取 $0^\circ \sim 180^\circ$,角度步长为 1° 。

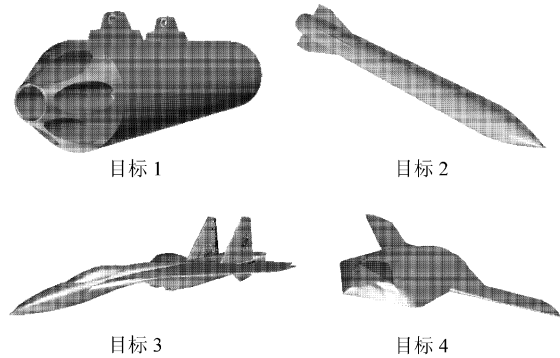


图 7 几个典型目标

Fig. 7 Some typical targets for calculation

表 1 中所给的预追踪射线管总数和精密计算分区数结果都是 181 个角度下的总和,因此对应的 η 可以认为是一种方位平均。

表 1 几个典型目标的预追踪结果

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4
预追踪射线管总数	37 692	69 013	6.35×10^6	1.30×10^6
精密计算分区数	6 437	9 146	3.54×10^5	3.79×10^4
η	0.042 0	0.033 0	0.014 0	0.007 3

从表 1 给出的结果中可以看出:对于机载武器类目标, $\eta < 0.05$;对于非隐身设计的飞机, $\eta < 0.015$;隐身设计的无尾飞机, $\eta < 0.01$ 。

结合式(7)分析预追踪法减小计算量的效果,式(7)中 τ 是一个较容易确定的量。如果预追踪采用与真实射线追踪相同的方法,则 τ 简化为预追踪射线管与普通射线追踪的射线管数目之比。单纯预追踪的射线管数目通常小于普通射线追踪法所需的 1/10,亦即 $\tau < 0.1$ 。根据式(7),采用预追踪法之后,可以将上面目标的 RCS 计算中射线追踪部分的计算量减小到原来的 0.15 倍以下。

图 8 是采用预追踪法前后 RCS 计算平台计算目标 1 结果的对比。计算平台采用的是:PO+(PTD(物理绕射)+ECM(等效电器))+RT 组合。预追踪射线管边长为 0.05 m,改进前射线追踪和精密追踪的射线管边长都为 0.001 m,预追踪完全按照真实追踪来进行, $\tau = 4 \times 10^{-4}$ 。采用

预追踪法之后,在同一 PC 机上整条曲线 181 个数据点的计算时间由原来的 36 min 16 s 减缩到 7 min 21 s(其中 PO+(PTD+ECM)部分耗时 2 min 4 s)。从图 8 来看计算结果有足够的精度。

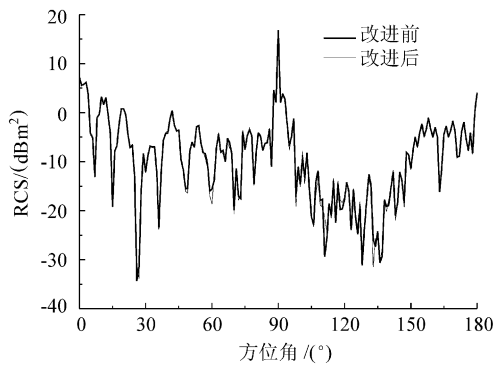


图 8 目标 1 的 RCS 计算结果对比

Fig. 8 The RCS calculation result comparison of target 1

由于程序中提取需要精密计算的分区并划分精密射线管部分的代码的执行效率还不够高,预追踪法的实际效果并没有预期的那么乐观,但是计算结果表明该方法仍然能显著地提高 RCS 计算平台的计算效率。

8 结 论

理论分析和计算实验表明,预追踪技术能够有效地降低 RCS 计算平台中耦合散射的计算量,提高整个计算平台的工作效率。对于常规目标,采用预追踪法通常可以将耦合散射的计算量降低到原来的 1/3 以下。预追踪法的另一个突出的优点是使用的灵活性,以及极易与其他方法结合使用的能力,这在文中都有描述。本文通过理论分析和试算给出了部分常规目标的耦合散射特征,这些结果数据对于预追踪法在相应类型目标上的应用以及其他方面的应用有相当的参考价值,相关的工作正在展开。

致 谢

感谢卢新来博士和白振东博士为论文的算例提供部分模型数据。

参 考 文 献

- [1] Elking M D, Roedder M J, Car D D, et al. A review of high-frequency radar cross section analysis capability at McDonnell Douglas aerospace[J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 1995(10): 33-43.
- [2] Hristos T A. A review of electromagnetic scattering analysis for inlets, cavities and open ducts [J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 2003(12): 27-40.
- [3] Glassner A S. An introduction to ray tracing[M]. San Diego: Academic Press, 1989.
- [4] Tan S Y, Tan H S. A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory [J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 1996(10): 1317-1325.
- [5] 黄沛霖. 大型、复杂耦合散射目标的 RCS 计算方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2003.
Huang P L. Research on RCS computing technique of large-scale and complicated coupling scattering object [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003. (in Chinese)
- [6] Bhalla R, Moore J, Ling H. A global scattering center representation of complex targets using shooting and bouncing ray technique[J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 1997(12): 1850-1856.
- [7] Bhalla R, Moore J, Ling H. 3D scattering center representation of complex targets using shooting and bouncing ray technique [J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 1998(10): 31-39.

作者简介:



黄敏杰(1982—) 男,博士研究生。主要研究方向:飞行器隐身技术。
Tel:010-82329491。
E-mail:huangminjiebuaa@163.com



李 葳(1982—) 女,硕士研究生。主要研究方向:射线追踪技术和有限元法的应用。
Tel:13811160074。

(责任编辑:李铁柏)