

文章编号:1000-6893(2009)09-1740-05

新型通用进气道类复杂腔体结构电磁散射计算方法

蒋应富, 李建周, 许家栋, 段洪

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710129)

A Novel and Universal Method for Calculating Electromagnetic Scattering from Complex Inlet Cavity Structure

Jiang Yingfu, Li Jianzhou, Xu Jiadong, Duan Hong

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

摘要: 利用 Unigraphics(UG)内部基于非均匀有理 B 样条(NURBS)的建模技术,采用 UG 二次开发,实现了在任意腔体中射线路径准确追踪,寻迹效率较高。提出一种射线追踪的新方法,解决了传统弹跳射线法(SBR)确定射线路径困难、精度不高和效率较低的问题。在此新方法基础之上开发了可以计算任意形状进气道类复杂电大腔体及角形结构雷达散射截面(RCS)的计算软件,实现了腔体建模与 RCS 计算的无缝集成,不用对腔体进行网格剖分,计算精度和效率都较高,使用方便,通用性好,具有较高的工程应用价值。使用该软件计算了圆形直腔、二面角和 S 形进气道的 RCS,结果与其他方法吻合良好,具有比较好的计算精度。

关键词: 进气道;任意形状腔体;电磁波散射;雷达散射截面;弹跳射线法;射线追踪;UG 二次开发

中图分类号: V211.48; V243.2 **文献标识码:** A

Abstract: Accurate and fast ray tracing in arbitrarily shaped cavities is realized in this article based on non-uniform rational B-splines (NURBS) modeling technique and a secondary development of Unigraphics(UG). A novel ray-tracing method is developed, which overcomes the disadvantages in ray-tracing of the traditional shooting and bouncing ray (SBR) method. Software is developed based on the novel method to calculate the radar cross section (RCS) of an arbitrarily shaped complex cavity and corner structure, in which cavity modeling and its RCS calculating are integrated in UG to provide a universal and promising platform for engineers to conduct easy cavity modeling and RCS simulation with good accuracy and high performance. Finally, the RCS of a circle cylinder, a dihedral corner reflector and an S-shaped inlet is calculated, and the results demonstrate high accuracy of the proposed method.

Key words: inlet; arbitrarily shaped cavity; electromagnetic wave scattering; radar cross section; shooting and bouncing ray; ray tracing; secondary development of UG

腔体结构是飞行器比较大的散射源之一,其典型代表为飞机和导弹的发动机进气道等大口径腔体结构,当进入空腔的电磁波经过腔体内壁的多次反射后,构成了一个强散射回波源。还有机翼与机身形成的二面角结构,都是很强的散射源。对各种电大尺寸复杂腔体结构的散射研究有着重大的意义。计算腔体雷达散射截面(RCS)主要方法有:矩量法(MOM)^[1]、有限元法(FEM)^[2]、时域有限差分法^[3]和高频法^[4-5]等,但由于前3种方法计算量大,难以用于计算电大腔体的 RCS,所以工程中普遍采用高频方法,其中弹跳射线法(SBR法)^[5-6]以其物理概念清晰、计算效率相对较高、可以计算较为复杂结构和方便处理内壁有

涂覆介质的腔体等优点,成为计算电大尺寸腔体 RCS 的首选方法。传统 SBR 法虽理论上已经成熟,但在工程应用中却有不少困难,其关键是在任意形状腔体结构中射线追踪的困难。要实现射线追踪,传统上有两种方法:①知道腔壁的精确几何描述^[5,7]。而工程实际中许多腔体结构很复杂,要解析表达出来非常困难,这种追踪方法只能对极少数规则、简单的腔体如圆直腔、矩形直腔体等有效。②将腔体壁剖分为许多小面元^[4,8],求射线在腔壁上的每个反射点都需要将射线与面元逐个求交,直到求出所有交点为止。这种方法理论上可以在形状较为任意的腔体内实现射线追踪,但实际上用这种方法确定的射线轨迹是不准确的。射线在腔体内反射次数越多,这个问题就越突出,计算出来的 RCS 精度就不高甚至是错误的。况且要确定反射点,需要大量的判断和求交

运算,对于电大腔体计算效率非常低。对复杂腔体还得考虑消隐问题,处理相当麻烦。以上困难的关键在于缺乏一种针对任意形状腔体结构的高效、准确的射线追踪方法。针对传统 SBR 法在射线追踪时存在的严重缺点,本文利用 Unigraphics (UG) 建模技术和 UG 二次开发,很好地克服了这些缺点:①提出了在任意形状腔体内准确地确定射线路径的新方法,寻迹效率相对较高,解决了传统 SBR 法存在的射线寻迹效率低、精度不高和寻迹困难等问题,从而提高了腔体 RCS 计算的精度。另外,还可以计算任意角形结构的 RCS,扩大了 SBR 法在工程中的应用范围。②在该新方法的基础之上,编写了通用的计算电大腔体 RCS 的程序,实现了腔体建模和 RCS 计算的无缝集成,开发了适用于任意形状的电大腔体散射计算软件。

1 基于 UG 二次开发的 SBR 法

SBR 法是一种高频近似方法。这种方法计算腔体散射的理论已经趋于成熟^[4-6],因此不是本文的重点。真正限制该方法在工程中应用的瓶颈其实就是在任意形状腔体中准确、快速地追踪射线,借助下面讨论的基于 UG 建模和 UG 二次开发的射线追踪法可以较好地突破这一瓶颈。

UG 是当今世界最先进的计算机辅助设计、分析和制造软件之一。它采用非均匀有理 B 样条技术(NURBS)作为建模工具,可以实现复杂形体准确、高效的构造。UG 还提供了功能强大的二次开发工具 UG/Open API 来实现 UG 与外部应用程序之间的交互。使用 UG/Open API 编写的应用程序可以在内部和外部两种环境下运行。而使用内部环境编写的应用程序是一个动态链接库(DLL 文件),具有文件小、链接快的特点,还可以通过 UG 的交互界面获取和创建模型,通过图形窗口查看程序的运行结果,所以采用内部环境,可以方便地实现 RCS 计算软件在 UG 中的集成^[9-10]。在 UG/Open API 中,包含有曲线与曲面求交运算接口,这种运算接口的算法完全基于 NURBS 曲线曲面的优化求交算法,运算精度和效率都很高,可以用来实现腔体内入射波传播路径与真实腔壁的准确求交。本文正是利用这个接口来实现射线在任意腔体内的追踪,基于 UG 二次开发的 SBR 法确定的射线在 S 形进气道内的路径,如图 1 所示。3 条入射射线的初始入射方向:

俯仰角 $\theta=30^\circ$,方位角 $\varphi=0^\circ$,图中显示的是从参考点开始,经腔体内的多次反射,最后到达口径面的路径。

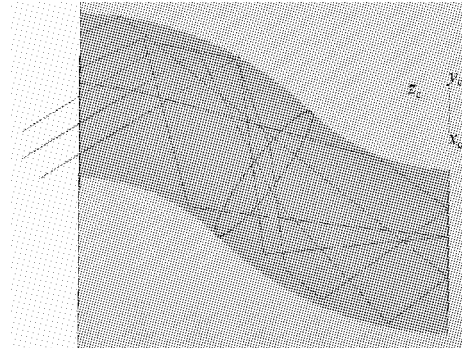


图1 基于 UG 二次开发的 SBR 法确定的射线在 S 形进气道内的路径图

Fig. 1 Ray paths found by SBR method based on secondary development of UG

这种射线追踪法与以往的方法完全不同:不需要对腔壁进行网格剖分,不需要编程来搜索反射点。实现这种新颖射线追踪的主要步骤是:

步骤 1 识别腔体模型。在提取射线追踪所需要的腔体几何信息前,首先需要识别出腔体,即识别出提取信息的对象。将 UG 中创建的腔体模型保存为部件文件(.prt),当其被加载到 UG 进程中后,有一个部件对象与其相关联,同时 UG 为这个部件对象分配了一个标识(tag),利用部件对象的标识,通过调用相关函数就可以查看、修改部件中大量的几何与非几何信息。所以首先得编程提取出腔体模型的标识。

步骤 2 反射点信息的提取。给出一条射线的起始点,设定射线的方向后,调用 UG/Open API 中一系列与射线追踪相关的函数,可以求出射线与腔体内壁交点以及交点的相关信息。然后求出反射线,对其与腔壁进行下一次求交,如此下去,直到射线出腔。

基于 UG 二次开发的 SBR 法计算腔体 RCS 的主要步骤是:

步骤 1 在 UG 中建立或导入已有的腔体模型,设置计算参数,运行程序。

步骤 2 程序将自动识别出腔体口径面,在口径面内划分三角形射线管,然后在腔体内追踪射线管(实际上是追踪射线管的 3 条棱线和中心射线),直到射线出腔。

步骤 3 计算中心射线出腔时与口径面交点处的电场以及出射线管与口径面相交区域的后向

散射场。

步骤4 将步骤3得到的所有射线管的后向散射场求和,就得到了腔体的后向总散射场,并计算其RCS。

在步骤3中,需要确定中心射线从入腔到出腔过程中的总散射因子DF,较为准确地求出它是SBR法的重点和难点之一,本文充分发挥基于UG二次开发的射线追踪的优势,通过求出射线管入腔和出腔时其在口径面处的横截面积 ΔS_0 和 ΔS_N 而方便地求得DF的幅度,所以关键是求DF的相位 $e^{-\frac{\pi}{2} \cdot m}$,其中: m 为此射线管从进腔到出腔过程中经过焦散线的次数。采用如下方法求 m :射线管3条棱与腔壁第 n 次和第 $n+1$ 次相交后,得到2个三角形,通过判断两三角形3个顶点相对位置的变化情况来确定射线管在两交点间穿过焦散线的情况(如:第 n 次相交得到的三角形3个顶点依次顺时针排列,而第 $n+1$ 次时变为逆时针排列,这表明射线管在两次反射间经过了一次焦散线),对射线管的每次反射都用这样的判断法,最后可求出 m ,关于求 m 的具体算法将另文发表。用以上方法求DF比文献[5]更简单、更易处理复杂腔体,比文献[8]精度更高。当然,只有在射线追踪准确性很高的前提下才能使用。

另外,基于UG二次开发的SBR法求任意腔体壁上一个反射点所花费时间基本一样,不会随着腔体尺寸的变化而明显变化,这就克服了基于面元剖分的SBR法随着腔体尺寸的增大,搜索一个反射点所需时间也急剧增大的缺点。所以本文方法计算电大腔体就有较大的优势,腔体电尺寸越大,结构越复杂,这种优势就越明显。

2 计算结果

本文程序基于第1节讨论的方法,应用UG的二次开发语言UG/Open,开发实现了任意腔体内的射线追踪和电大腔体RCS计算软件,该软件将腔体建模、RCS计算集成到UG中,具有良好的通用性。软件的运行环境是Windows XP操作系统,Pentium(R)4—2.80 GHz处理器,1 GB内存。计算腔体的腔壁都是理想导体,入射波频率10 GHz,角度步长为 1° ,每平方波长内追踪的射线为150条。

2.1 圆形直腔

为验证本文提出的基于UG二次开发的SBR法寻迹的准确性和高效性,计算了2个圆形直腔的

RCS,结果如图2所示。图2(a)中传统SBR法的数据引用自文献[11](其射线追踪方式是:写出圆腔的解析表达式,使用直线与曲面的求交来准确地求出射线在腔壁上的反射点,整个计算用时约21.23 min。显然地,若使用基于面元的SBR法将用时更多,而且计算精度会降低),在运行环境与原文基本一致的情况下,用本程序计算用时约3.16 min,可见此算例中本文方法效率比传统SBR法(基于解析表达式)提高近7倍,而精度与其相当,并易推知基于UG二次开发的SBR法相对于基于面元的SBR法在精度和效率上都占有优势。图2(a)中两种不同射线追踪法计算出的RCS吻合得较好,都能较好地反映出此腔体RCS的变化趋势,两条曲线存在差异的原因主要是文献[11]中使用的是四边形射线管,以及两程序在一些细节上的处理上可能不同。图2(b)计算用时为87.03 min,平均每个角度计算用时约为1.71 min,而计算每个角度都要追踪约47 124条入射线,进一步表明本文方法的效率相对较高,另外可以看出此算例中本文方法和模式法(Modal)吻合得较好。通过图2的2个仿真结果还可以得出下列结论:①间接验证了本文提出的基于UG二次

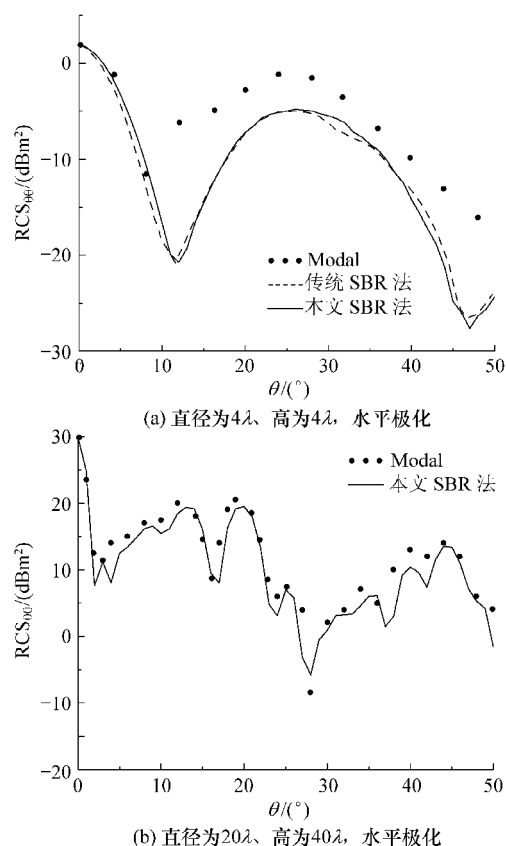


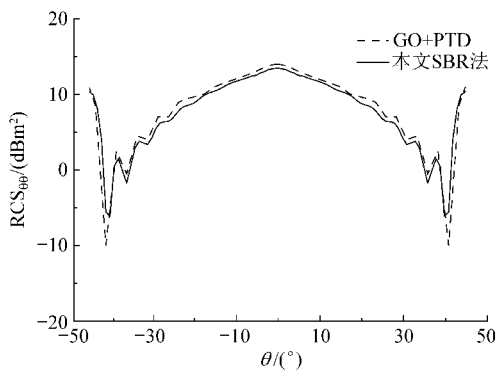
图2 2个圆形直腔的RCS

Fig. 2 RCS of two open circular cylinders

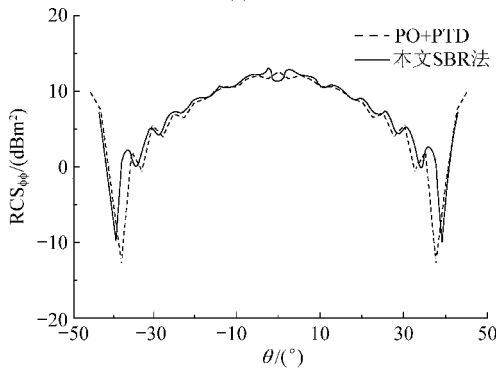
开发的 SBR 法确定的射线路径是准确的;②本文求总散射因子 DF 的方法是可行的;③本文方法计算出的 RCS 精度相对较高,对比图 2(a)与图 2(b)可发现腔体电尺寸越大,结果越准确。

2.2 二面角

基于 UG 二次开发的 SBR 法不但具有较高的精度,而且可以方便地计算任意电大双平面、曲面和三面角等角形结构的 RCS,实现了算法和程序的统一。图 3 是一个二面角的 RCS 计算结果,其两平板尺寸都为 $a = b = 5.0688\lambda$, 夹角为 90° 。可以看出本文方法与文献[12]中的几何光学法+物理绕射理论(GO+PTD)、物理光学法+物理绕射理论(PO+PTD)吻合得较好,两种方法存在细微差别的主要原因是本文 SBR 方法未考虑绕射对 RCS 的影响。



(a) 水平极化



(b) 垂直极化

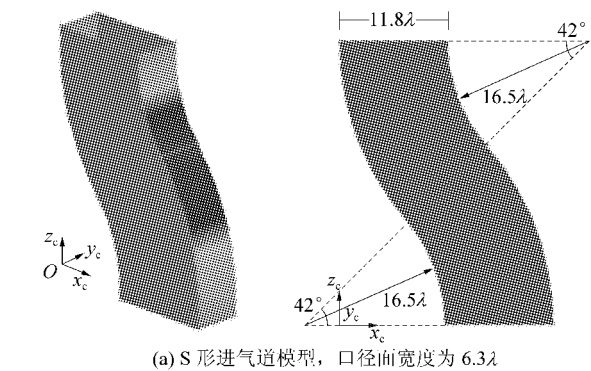
图 3 直角二面角的 RCS 计算结果

Fig. 3 RCS of 90° dihedral corner reflector

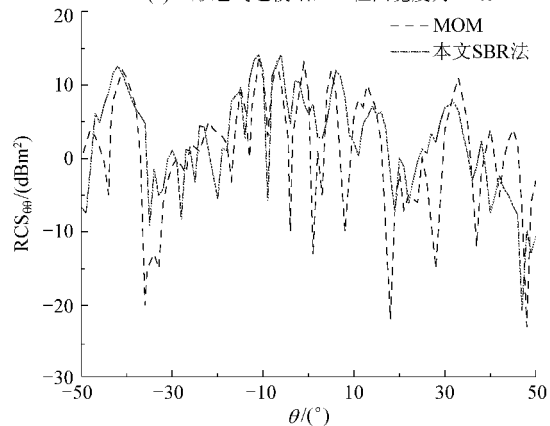
2.3 S 形进气道

图 4(a)是一个 S 形进气道模型,其终端是导电平板,图 4(b)为其 RCS 计算结果,总共计算用时为 34.81 min。计算结果表明本文 SBR 方法和 MOM^[13]吻合得较好,说明基于 UG 二次开发的 SBR 法可以在复杂腔体中准确追踪射线,计算效

率较高,克服了传统 SBR 法计算电大尺寸复杂腔体时存在的射线追踪困难和效率不高的缺点。



(a) S 形进气道模型, 口径面宽度为 6.3λ



(b) 本文SBR法和MOM计算结果比较

图 4 S 型进气道及其 RCS 计算结果, 水平极化

Fig. 4 S-shaped inlet and its RCS, horizontal polarization

3 结论

提出的基于 UG 二次开发的 SBR 法可较为准确、快速地实现在任意形状腔体内的射线路径追踪,不用对模型剖分网格,不用消隐处理,它克服了传统 SBR 法在任意腔体中射线追踪困难的缺点,对电大腔体 RCS 的计算实现了程序的统一,并实现了腔体建模和 RCS 计算的一体化,通用性好,计算结果准确,效率较高。在该方法基础之上开发的腔体 RCS 计算软件为分析飞行器进气道、机翼(弹翼)与机身(弹身)构成的角形结构以及飞行器上其他凹形结构的 RCS 提供了一个统一的平台,使用方便,具有较好的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] Harrington R F. Field computation by moment methods [M]. New York: Macmillan, 1968.
 [2] Liu J, Jin J M. A special higher order finite-element method for scattering by deep cavities[J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 2000, 48(5): 694-703.
 [3] Chia T T, Burkholder R T, Lee R. The application of

- FDTD in hybrid methods for cavity scattering analysis [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1995, 43(10): 1082-1090.
- [4] Pathak P H, Burkholder R J. Modal, ray, and beam techniques for analyzing the EM scattering by open-ended waveguide cavities[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1989, 37(5): 635-647.
- [5] Ling H, Chou R C, Lee S W. Shooting and bouncing rays; calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1989, 37(2): 194-205.
- [6] Ling H, Lee S W, Chou R C. High-frequency RCS of open cavities with rectangular and circular cross sections [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1989, 37(5): 648-654.
- [7] 阮颖铮. 电磁射线理论基础[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1984.
Ruan Yingzheng. The basic theory of electromagnetic radial[M]. Chengdu: Chengdu Telecommunication Engineering College Press, 1984. (in Chinese)
- [8] Mittra R, Rushdi A. An efficient approach for computing the geometrical optics field reflected from a numerically specified surface [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1979, 27(6): 871-877.
- [9] 李建周, 吴昌英, 侯新宇, 等. 基于 Unigraphics 的雷达截面预估软件设计[J]. *电波科学学报*, 2005, 20(2): 222-225.
Li Jianzhou, Wu Changying, Hou Xinyu, et al. Design of RCS evaluation software based on Unigraphics[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(2): 222-225. (in Chinese)
- [10] 李建周, 许家栋, 郭陈江, 等. 一体化雷达散射截面计算方法研究[J]. *西北工业大学学报*, 2003, 21(4): 449-452.
Li Jianzhou, Xu Jiadong, Guo Chenjiang, et al. Integrative RCS (radar cross section) calculation as a much more efficient method of RCS calculation[J]. *Journal of North-western Polytechnical University*, 2003, 21(4): 449-452. (in Chinese)
- [11] 郭华昌. 复杂终端电磁散射的 SBR 与 FDTD 混合方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
Guo Huachang. Studies of electromagnetic scattering from a cavity with a complex termination by means of a hybrid SBR/FDTD method[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [12] Griesser T, Balanis C A. Backscatter analysis of dihedral corner reflectors using physical optics and the physical theory of diffraction[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation* 1987, 35(10): 1137-1147.
- [13] 张浩斌, 马凯学, 许家栋. 模式传输法计算腔体的 RCS [J]. *微波学报*, 2002, 18(4): 35-39.
Zhang Haobin, Ma Kaixue, Xu Jiadong. RCS calculation of cavity by modal propagation algorithm[J]. *Journal of Microwaves*, 2002, 18(4): 35-39. (in Chinese)

作者简介:

蒋应富(1984—) 男, 硕士。主要研究方向: 电磁散射, 电磁场数值计算等。

Tel: 13072991832

E-mail: jiangyf5413@163.com

李建周(1972—) 男, 副教授。主要研究方向: 目标建模及电磁散射计算等。

E-mail: ljz@nwpu.edu.cn

许家栋(1948—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 微波测量系统、电磁波传播、散射与逆散射等。

E-mail: jdxu@nwpu.edu.cn

(编辑: 鲍亚平, 张利平)