

GRE-FDTD 混合法对二维矩形终端任意形状进气道 RCS 的计算

王树民 李明之 王长清

(北京大学电子学系,北京 100871)

摘要: 本文利用 GRE-FDTD 混合法分析了带复杂终端任意形状进气道的雷达散射截面问题,提出了基于离散模型的任意形状腔体内射线追踪方法,并对该方法的可行性进行了讨论,最后通过对二维情形的计算和分析验证了方法的正确性。

关键词: 复杂终端;缓变腔体;雷达散射截面;广义射线展开法;时域有限差分法;射线追踪

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2000)06-0138-04

Using GRE-FDTD Hybrid Method to Calculate the RCS of an 2D Rectangular Cavity with a Arbitrarily Shaped Termination

WANG Shu-min ,LI Ming-zhi ,WANG Chang-qing

(Department of Electronics ,Peking University ,Beijing 100871 ,China)

Abstract: The RCS of an arbitrarily shaped cavity with a complex termination is analyzed in this paper by using GRE-FDTD hybrid method. A new ray-tracing method based on the discrete modeling of cavity is presented. The 2D results confirm the reality of this method.

Key words: complex termination ;cavity with slowly varying shape ;radar cross section ;generalized ray expansion method ;finite difference time domain method ;ray tracing

1 引言

带复杂终端进气道的电磁散射是计算飞机目标雷达散射截面的关键问题之一。采用高频方法,如模式法(Modal-Method)、弹跳射线法(SBR)与广义射线展开法(GRE)等处理缓变腔体可以得到很好的结果,但在处理终端时,由于未考虑绕射效应,只能处理平板等极为简单的情形。采用数值方法,如矩量法(MoM)、有限元法(FEM)和时域有限差分法(FDTD)等能精确模拟终端的细节特性,但要计算整个腔体则所需的存储空间与计算时间会难以承受。

从目前已有的研究成果看,实际可行的方法是采用混合方法,即用高频方法处理缓变部分,用数值方法处理复杂终端,再将两者以适当的方式结合起来,从而得到整个腔体的散射特性。因为进气道的截面形状是复杂多样的,所以必须选用一种可处理任意截面,弯曲轴线进气道的方法。传统的模式法具有很高的精度,但对于不规则腔体则很难找到解析解。另外,进气道横截面电尺寸较大,传播模式很多,增加了计算复杂度。用射线法可有效地解决这一问题,对于复杂终端,则应选取对内存与计算量要求较小,容易建模的方法。FDTD 方法满足此要求,并通过一次计算获得宽频带的结果,故我们选择 GRE-FDTD 混合法。

以前的工作主要考虑二维平板腔体情形,为把这一方法用于任意形状的腔体,需要解决射线追踪问题。本文提出一种

基于离散模型的追踪方法,并用此方法获得了一些满意的结果。

2 方法概述

2.1 GRE 方法和射线追踪

GRE 方法在文献[1]中已有详述,本文仅对其要点作一介绍。在此方法中,进气道口面处的入射场由 Kirchhoff 近似化为等效电流,腔内场被认为是由此激发而得。对于较大的腔体,其口面被分为若干子口面,由每个子口面中心发出一组锥形射线束。每一锥形射线束的强度以其中心发出一组射线束。每一锥形射线束的强度以其中心射线的强度为代表,用几何光学方法(GO)对中心射线进行追踪,强度用物理光学法(PO)计算。

从某一子口面发出的射线的初始强度可从 Stratton-Chu 公式出发,加上远场条件,由下述公式决定^[1]:

$$E_n(r_n^p) = -\frac{ik}{4\pi} \frac{e^{-jkr_n^p}}{r_n^p} \left\{ \iint_{S_n} \hat{r}_n^p \times [\hat{s}'_n \times E_i(r'_n)] e^{jkr'_n \cdot \hat{r}_n^p} ds' \right. \\ \left. - Z_0 \hat{r}_n^p \times \iint_{S_n} \hat{r}_n^p \times [\hat{s}'_n \times H_i(r'_n)] e^{jkr'_n \cdot \hat{r}_n^p} ds' \right\} \quad (1)$$

其中, k 为入射波矢量, r_n^p 为指向由第 n 个子面中心发出的第 p 根射线方向的矢量, r'_n 为在第 n 个子口面内指向某一等效源点的矢量, \hat{s}'_n 为指向腔体内部的子口面的单位法向量, $H(r'_n)$ 与 $E(r'_n)$ 为无腔壁时的入射磁场与电场。远场条件是:

$$r_n > 2 \frac{L_n^2}{\lambda} \quad (2)$$

其中 L_n 为子口面的线度, λ 为入射波长, 式(1)可根据入射场与子口面形状的具体情况给出严格解或数值解, 射线在腔内被不断反射, 强度由下式决定:

$$E(r_i) = \Gamma \cdot E(r_{i-1}) \cdot (\mathbf{DF})_{i-1} e^{-jks} \quad (3)$$

其中 r_i 为第 i 次反射时的位置, Γ 为理想导体反射矩阵, $s = |r_i - r_{i-1}|$, $(\mathbf{DF})_{i-1}$ 为由 $i-1$ 次反射所决定的扩散矩阵, 具体形式可参考文献[2]。

GRE 方法考虑了 SBR 方法所忽略的进气道边缘射电流, 其计算精度比 SBR 方法高得多。SBR 方法通常只能给出大致趋势。另一方面, 虽然对单一入射角度 SBR 方法较快, 但 GRE 方法一次追踪的结果可用于不同入射角度的计算。从精度与效率两方面考虑, GRE 方法更优越。它的主要缺点是对不连续情形, 如边、棱、尖点等, 错误很大, 这也是射线法的通病。实际进气道并不存在上述问题, 故 GRE 方法在此是适用的。

GRE 方法的关键是实现一种精确、高效的追踪算法。要求精确是因为 PO 方法在几何光学基础上按公式(3)进行。一方面 $(\mathbf{DF})_i$ 矩阵连乘使最后结果对每一步引入的误差非常敏感。另一方面, 光程 s 的绝对误差即使在一个波长范围之内也会给位相 e^{-jks} 带来很大的相对误差, 所以必须精解地进行追踪, 严格控制误差积累。要求高效是因为追踪程序会被反复调用。GRE 算法中, 子口面划分越细, 射线锥取得越多, 精度就越高^[1]。考虑一个长 110λ , 口面宽 9.6λ 的余弦型二维腔体, 观察角度为 $-45^\circ \sim +45^\circ$, 观察点为 91 个, 则需将进气道口面划分为三个子口面, 每个子口面发出 1675 个射散锥, 共追踪 5025 根射线, 即需调用追踪子程序 5025 次。三维实际问题的规模远比这大得多, 而且一般情形下的精确计算需要正向与反向两次追踪, 由此可见效率很重要。

目前文献所见追踪算法主要基于两类腔体描述方法: 整体近似与分段近似。整体近似是将整个腔体的形状用一个解析函数表示。它的优点是简单高效, 除了解方程外不需额外编程计算。缺点是精度太差, 而且实际的三维进气道很难用一个解析函数表示。若采用近似解, 由于射线在腔内多次反射所导致的误差积累会很大。对有些射线, 问题可能不仅是出射点位置与方向发生偏移, 还可能是出射口面完全不对。如射线本应从 S_F 面(图 1)出射, 结果却为从入口面射出。分段近似是采用分段解析函数来表示进气道^[1]。此方法部分改善了描述的准确性, 但精度还嫌不足, 实际上也不可能对任意形状进气道预先找出这样一种分割, 使有最大限度的点集之间可用圆弧

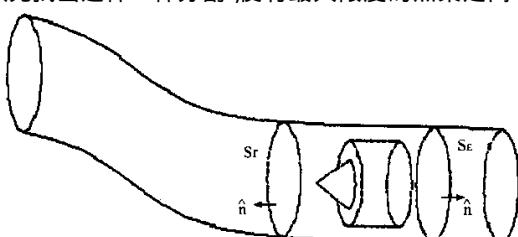


图 1 典型的飞机进气道模型

或直线近似(二维情形)。

较为可行且符合实际的方法是对进气道完全采用离散化的描述方式, 即仅用有限个点的坐标来表示整个进气道, 并以此为据对射线进行追踪。这里有三个问题要考虑: 一是用什么方法由离散点拟合出腔体原形, 二是取多少离散点, 三是追踪算法。限于篇幅, 本文仅讨论二维情形。

对于二维问题, 有两种简单的拟合方法较为适用。一种是线性拟合, 另一种是三次函数拟合。线性拟合计算量小, 精度差; 三次函数拟合正好相反, 对于曲率很小的腔体, 例如可近似为平板的情况, 取几个点, 用线性拟合即可。形状变化较剧烈的则不然。例如 10λ 的余弦型腔体, 当离散点数目取 300 时, 线性拟合的精度才能与三次函数拟合取 100 个离散点时的精度相比。更精确的拟合方法可采用三次样条函数, 它具有 C^2 的连续性。在离散数目问题上, 只要取得足够多, 进气道可以被相当精确地表示出来。事实上离散点的个数总是有限的。另一方面, 采用高精度的插值方法也可减少对型值点数目的需求。因此, 离散点数目的选取应与拟合方法及腔体形状结合起来考虑。本文用五点三次的 Akima 方法生成腔体形状曲线。对缓变情形(余弦型), 每波长取 10 个点即可使光程相对误差控制在 0.16% 以内, 绝对误差不超过 $1/10$ 个波长。

在离散化网格空间中追踪射线是一件困难的事情。一方面, 要求算法能准确地计算出反射点的位置及相关的几何信息。另一方面, 要求算法高效。这两方面往往是互相矛盾的。平均而言, 计算一次反射的效率与离散点的个数 N 成正比。这将直接影响 GRE 算法的效率。因此, 必须寻求一种高效的追踪算法, 使它在非大角度入射(GRE 算法有效范围内)情况下效率最高。

2.2 FDTD 方法

本文采用 FDTD 方法是基于以下考虑: 首先, 建模简单。FDTD 方法将任何问题均作为初边值问题求解, 方程的形式使边界条件自动得到满足。对于复杂目标, 只要给出相应点处的 ϵ 和 μ 值, 即可表示其特性。这就使描述复杂终端的工作得到简化, 而且应用不同坐标系下 FDTD 方法以及各种共形技术, 可使该项工作得以较好地完成。其次, 节省时间与内存。若设网格点总数为 N , 则 FDTD 方法所需的 CPU 时间与存储空间均为 $O(N)$, 比其它数值方法优越。最后, FDTD 法特别适合于并行计算。关于本算法的详细论述, 可参考有关专著^[3]。

2.3 GRE 与 FDTD 的耦合

用混合法解决复杂终端进气道散射问题时把进气道分成两个区域, 如图 1 所示。 S_F 面以前用 GRE 方法求解, S_F 面与 S_E 面之间用 FDTD 法求解。由 GRE 方法得到的场需要在 S_F 面上转换为适合于 FDTD 方法的形式。可用下述公式:

$$E_i = \sum_{n,p} E_n^p \quad (4)$$

其中, E_i 为第 i 个格点的场强, E_n^p 为入射到该格点的由第 n 个子面发出的第 p 根射线的场强。设场量随时间作正弦变化, 通过改进 Mur 二阶吸收边条件可将 S_F 面上的入射场耦合到 FDTD 网格中, 并同时求出 S_F 面上反射场^[4]。

2.4 散射场的计算

进气道的远区散射场包含两部分场的贡献(1)直接由腔体反射回入口面的场,(2)由终端反射回的场.第一部分用等效源法求得,第二部分可由 S_T 面上的FDTD解作为激发,用GRE方法反向追踪至入口面,再根据等效源法求得.还可用广义互易定理,取前一次追踪的结果的直接计算.具体做法可参考文献[1].

单纯计算进气道的RCS,用广义互易定理简单.若考虑与机身其它部件的耦合则必须用等效源法.本文计算采用广义互易定理.

3 计算结果及分析

对二维平板腔体复杂终端情形,文献[5]中已有讨论.针对任意形状腔体对三个问题计算其单站RCS.由于是在二维情况下进行计算,因而实际上计算的应为散射宽度.为方便起见,仍称其为三维RCS.其计算公式为^[5]:

$$\sigma = 10 \log_{10} \lim_{R \rightarrow \infty} 2\pi R \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \quad (5)$$

问题1是用GRE方法计算平板腔体,分别采用解析与离散两种方式描述腔体并进行追踪.进气道口面被分为三个子

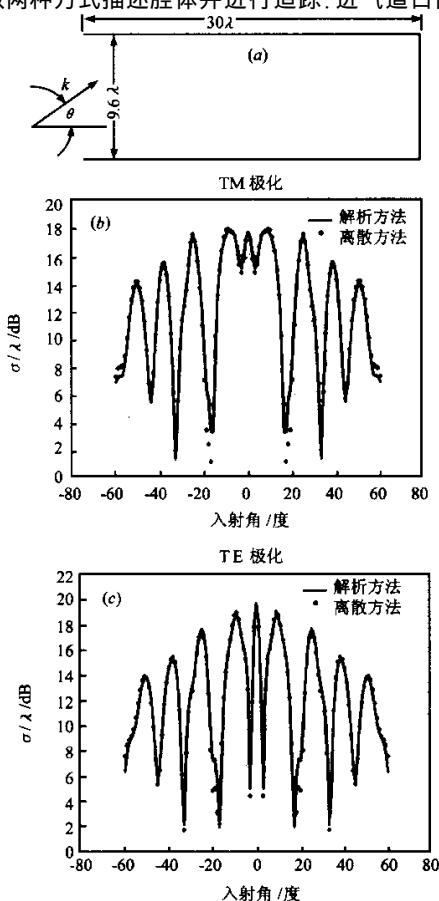


图2 二维平板腔体的散射

口面,每个子口面发出197个射线锥.结果如图2所示.图中纵坐标已对波长归一,为 σ/λ ,可见在离散化的腔体中追踪与在解析形式描述的腔体中追踪的结果吻合得很好,本文所提出的算法是正确的.

问题2是用GRE方法计算了两个对称放置的腔体,采用离散方法追踪.其中进气道口面分为三个子口面,每个子口面发出201根射线.结果如图3.可见其RCS曲线是完全对称的.该结果验证了追踪程序的正确性.

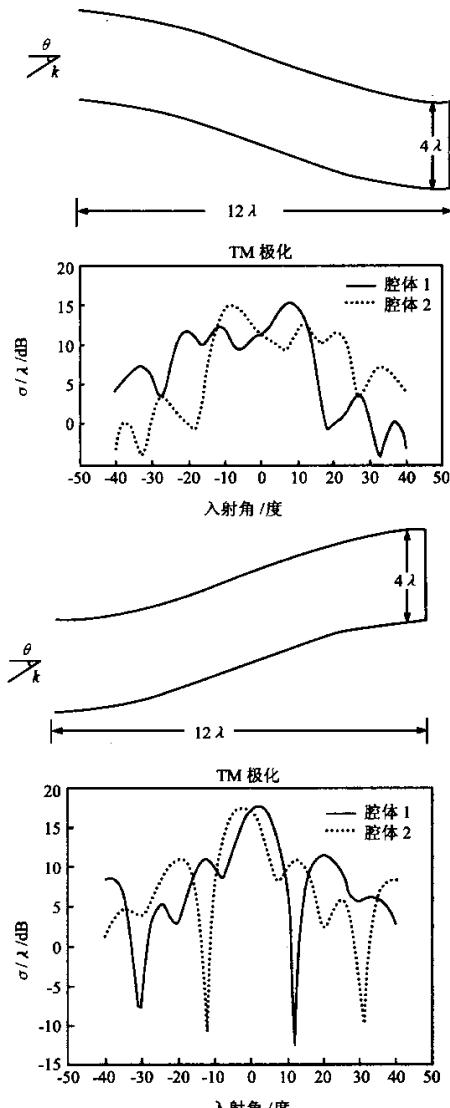


图3 两个二维弯曲腔体的散射

问题3是对弯曲腔体简单终端情形采用GRE-FDTD混合法与单独采用GRE方法的比较.两者均用离散的追踪方法.其中GRE方法分别取不同的子口面与射线锥数,结果如图4所示.图中GRE方法所注第一个参数为子口面数,第二个为射线锥数.这说明GRE方法结果依赖于子口面与射线锥划分的精细程度.为得到精确的结果必须细分子口面与射线锥.

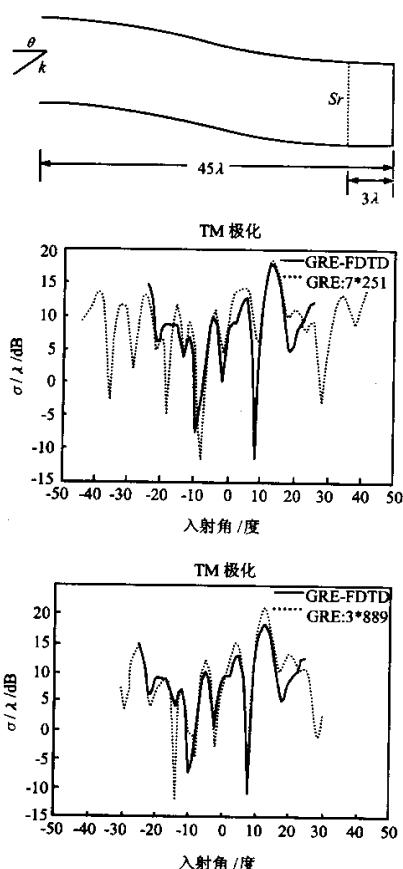


图 4 二维弯曲腔体的散射

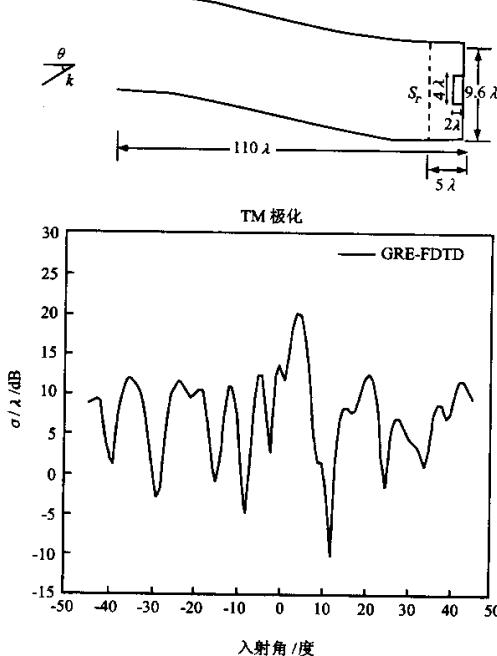


图 5 二维矩形终端弯曲腔体的散射

可以注意到在某些小角度情况下误差较大,原因是腔体的形状使这些角度对应掠入射,而这正是 PO 方法失效的区域.

最后,给出一个终端为矩形的弯曲腔体的计算结果(图 5).计算时将口面分为 3 个子口面,每个子面发出 1675 根线.由于用 FDTD 方法可以较为精确地模拟复杂终端而不增加计算复杂度,故该算例表明 GRE-FDTD 方法可以处理终端为比矩形复杂得多的形状的情况.

4 结论

进气道是飞机的主要电磁散射源之一.计算表明,通过有效的追踪算法,GRE-FDTD 混合方法可以处理任意形状进气道的散射问题.本文提出的基于离散模型的任意形状腔体内射线追踪算法是切实可行的,这为实际三维进气道以及飞机整体电磁散射问题的最终解决提供了一条可能的途径.

参考文献

- [1] R. J. Burkholder and P. H. Pathak. High-frequency asymptotic methods for analyzing the EM scattering by open-ended waveguide cavities. Ph. D. dissertation Ohio State University, 1989
- [2] 汪茂光. 几何绕射理论. 西安电子科技大学出版社, 1994
- [3] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法. 北京大学出版社, 1994
- [4] Robert Lee and Tse-Tong Chia. Analysis of electromagnetic scattering from a cavity with a complex termination by means of a hybrid Ray-FDTD method. IEEE Trans. AP, 1993, 41(11):1590~1596
- [5] 刘友键, 李明之, 王长清. 计算腔体电磁散射的一种混合方法. '95 复杂目标 RCS 全国学术研讨会论文集

王树民 男, 1972 年生于山东青岛.1995 年青岛大学物理系获理学学士学位.1998 年在北京大学电子学系获得理学硕士学位.现在美国俄亥俄州立大学电子工程系攻读博士学位.主要擅长电磁场数值计算.

李明之 男, 1969 年生于湖北武汉.分别于 1991 年和 1994 年在西安电子科技大学手理系获得学士和硕士学位.1997 年在北京大学电子学系获得博士学位.现在该系任教.主要研究领域为电磁理论、复杂目标的电磁散射、雷达散射截面的预估和缩减、微波技术、数值计算方法和 CAD 技术.

或见“电子学报”1999 年第三期第 133 页.

王长清 见“电子学报”1997 年第九期第 55 页.

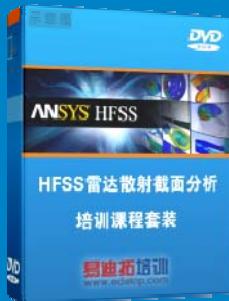
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>