

带有腔体或槽缝的电大尺寸 目标电磁散射特性分析

丁卫平¹, 徐金平^{2,1}

(1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏南京 210016; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 本文提出了一种新的混合方法—FEM/PO-PID法, 应用于分析计算带有腔体或槽缝的电大尺寸复杂目标电磁散射问题. 在该方法中, 采用基于棱边的有限元法(edge-based FEM)为低频方法, 物理光学法(PO)与物理绕射理论(PID)为高频方法, 通过耦合技术将两者结合在一起. 为了验证该方法的准确性, 本文首先将其应用于三维无穷接地开口腔体的电磁散射特性分析, 计算结果与有关文献的数据一致性很好. 在此基础上, 给出了几种不同介质填充的三维开口腔体和带有槽缝的三维有限尺寸导体柱雷达散射截面的计算曲线, 对分析有关工程问题有指导意义. 理论分析与计算结果表明, 本文提出的混合方法与其它计算同类问题的方法相比, 能节省计算机存储单元、提高计算速度.

关键词: 电磁散射; 物理光学法; 物理绕射理论; 基于棱边的有限元法; 等效原理

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)06-0815-04

Evaluation of Electromagnetic Scattering by Electrically Large Bodies with Cracks and Cavities on Their Surfaces

DING Wei-ping¹, XU Jin-ping^{2,1}

(1. College of Information Science and Technology, NUA, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: A novel hybrid technique is presented for the evaluation of electromagnetic scattering by electrically large bodies with cracks and cavities on their surfaces. This technique employs the edge-based finite-element method (FEM) to compute the scattering from the cracks and cavities, and PO and PID to compute the scattering from the large bodies with the cracks and cavities filled with perfect conductors. A coupling scheme is then developed to combine these two methods. A set of numerical results is presented, demonstrating the accuracy, efficiency, and capability of the technique. As practical uses of the hybrid technique, a number of original results are then presented. It is shown that the hybrid technique has some advantages over other methods in regard to saving computer memory units and CPU time.

Key words: electromagnetic scattering; PO; PID; edge-based FEM; the equivalence theorem

1 引言

随着隐身和目标识别等技术的不断发展, 带有腔体或槽缝的电大尺寸复杂目标的电磁散射问题在实际工程中变得越来越重要. 如飞机舱门、机翼等部件的 RCS 计算. 由于这类电大尺寸目标上附加有电小尺寸的腔体或槽缝, 因此, 使用单独的高频或低频方法^[1-3]都难于精确计算其电磁散射特性. 有效的解决方法是针对具体的结构特点, 采用高频方法与低频方法相结合的混合技术. 文献[4]中, 采用 SBR 与 FEM 方法相结合, 分析复杂目标的电磁散射特性, 并给出了一些算例. 但是, 当目标电尺寸较大时, SBR 方法需要划分许多射线管, 从而增加了计算机存储单元的需求, 降低了运算速度. 文献[5]

采用 IPO 与 MoM 方法相结合, 计算二维开槽电大尺寸目标的 RCS 曲线, 由于矩量法在处理非均匀介质填充时比较困难, 同时, 运用矩量法得到的系数矩阵为满元素矩阵, 无法采用稀疏矩阵求解技术.

基于棱边的有限元法(edge-based FEM)^[6]是近年来国外发展起来一种新的方法, 它区别于基于节点的有限元法(node-based FEM)之处在于, edge-based FEM 是将自由度赋予剖分单元的棱边而不是单元结点, 即使用的是所谓矢量基或矢量元, 这种方法可以消除 node-based FEM 存在的伪解问题以及在介质或导体界面及棱边处不易强加边界条件等缺点.

本文将基于棱边的有限元法与物理光学法和物理绕射理

论相结合,分析计算电大尺寸复杂目标的电磁散射特性.根据等效原理,将原有问题分解为腔体或槽缝填充完纯导体后大导体的散射和腔体或槽缝散射两个问题,分别采用上述高频和低频方法进行分析,利用腔体或槽缝开口面上场的连续性条件将内外场耦合在一起,从而研究整个复杂目标的电磁散射特性.由于 PO-PID 方法对规则形状的电大尺寸导体目标 RCS 分析能得出散射场的解析解形式,而且在 edge-based FEM 求解过程中采用稀疏矩阵求解技术,因此该混合方法具有节省计算机内存、计算时间短等优点.

2 基本理论

本文所研究的带有腔体或槽缝的电大尺寸目标,其结构示意图如图 1 所示.利用场等效原理,原有问题可以分解成将腔体或槽缝填充完纯导体后大导体的散射和腔体或槽缝散射两个问题.

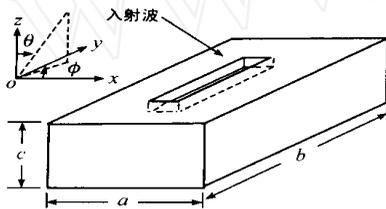


图 1 原有问题结构示意图

对第一个问题(外问题),采用高频方法计算是非常有效的,本文采用物理光学法(PO),在导体边缘辅以物理绕射理论(PID).

对第二个问题(内问题),采用基于棱边的有限元法作为低频方法,同时应用内、外问题的耦合来分析腔体或槽缝内的场分布,得到腔体或槽缝开口面的等效磁流,进而求出槽缝或腔体开口面的散射场.下面给出三维理论模型的具体建立过程.

2.1 Edge-Based FEM

根据变分原理,腔体内电磁问题的等效泛函为^[6]

$$F(E) = \frac{1}{2} \iiint_V \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E \cdot E \right] dV + jk_0 Z_0 \iint_a (E \times H) \cdot n dS \quad (1)$$

其中 V 为腔体体积, S_a 为腔体开口面.

为了离散总的泛函 F ,需对腔体体积进行剖分.将腔体体积剖分成 M 个四面体单元,使用矢量基函数,在每个单元内的场可展开为

$$E^e = \sum_{i=1}^n E_i^e N_i^e = \{ E^e \}^T \{ N^e \} = \{ N^e \}^T \{ E^e \} \quad (2)$$

其中 n 表示展开项的数目, E_i^e 表示未知的展开系数, N_i^e 表示第 e 个单元选择的矢量基函数.

为了离散式(1)中的面积分,将面元场展开为

$$n \times E^e = \sum_{i=1}^{n_s} E_i^e S_i^e = \{ E^e \}^T \{ S^e \} = \{ S^e \}^T \{ E^e \} \quad (3)$$

$$S_i^e = n \times N_i^e \quad (4)$$

其中 n_s 表示展开项的数目, E_i^e 表示未知展开系数, S_i^e 表示选择的矢量基函数.

将式(2)~(4)代入式(1)中的各剖分单元泛函积分式,并使用全局编号,按照里兹方法,得到如下线性方程组

$$[K]\{E\} + [D]\{H\} = 0 \quad (5)$$

上式中有 $N + M_s$ 个未知数,只有 N 个方程(N 为腔体剖分后棱边的总数, M_s 为开口面上剖分的棱边总数),要求解腔体开口面上的切向电场,需通过后面所述的内外问题的耦合技术来建立完备的线性方程组.

2.2 PO-PID

对于完纯导体目标,物理光学法的出发点是以下磁场积分方程

$$H^{PO}(r) = \iint_s J(r) \times \nabla G_0(r, r) dS \quad (6)$$

$$J(r) = \begin{cases} 2n \times H_i(r) & \text{, 照明区} \\ 0 & \text{, 阴影区} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $H^{PO}(r)$ 为散射场, $H_i(r)$ 为入射波磁场, $J(r)$ 为导体表面电流, $G_0(r, r)$ 为自由空间格林函数, n 为导体表面的外法向单位矢量.

在上述 PO 计算式中没有考虑导体边缘的影响,即认为在导体边缘处表面电流突然中断,这与实际情况是不相符的,在散射场和 RCS 的计算中将带来误差.为修正这一误差,在导体边缘处引入 PID 方法^[1].

任意极化的入射波可以分解为电场平行或垂直于边缘的两种极化情况的组合.对如图 1 所示结构,在 TE 模入射情况下,电大尺寸导体目标的四个 y 方向棱边,其绕射场可表示为

$$H_y^e = H_{y0} g b \frac{e^{-jkR}}{2R} \quad (8)$$

式中 g 为绕射系数^[1], R 为对应棱边到空间场点的距离, H_{y0} 为入射波在棱边处的磁场分量.

2.3 Edge-Based FEM 与 PO-PID 方法的耦合

在腔体内场问题的求解过程中,如果将内、外问题完全割裂,只采用 edge-based FEM 处理内问题,则只能得到一组方程,即式(5).由于此方程组有 $N + M_s$ 个未知量而只有 N 个方程,所以无法求解.要得到腔体或槽缝开口面上的等效磁流,可利用开口面上场的连续性特点,将内外问题耦合在一起.

对有限尺寸目标上的腔体或槽缝,利用开口面上场的连续性特点,其开口面上方外部空间的磁场可表示为

$$H = H^{inc} + H^{PO} + H^{PID} - jk_0 Y_0 \iint_a \bar{G} \cdot M dS \quad (9)$$

其中 H^{inc} 为入射波波磁场, H^{PO} , H^{PID} 分别为用 PO 和 PID 方法得到的由于电大尺寸目标对入射波的反射和绕射在腔体或槽缝开口面上的磁场, $\bar{G} = \bar{G}_{half} + \bar{G}_{diff}$, \bar{G}_{half} 为半空间并矢格林函数, \bar{G}_{diff} 为开口面上绕射和反射的并矢格林函数, M 为开口面上的等效磁流.如果腔体或槽缝距离电大尺寸目标的边缘足够远(几个波长),则 \bar{G}_{diff} 比 \bar{G}_{half} 小得多,在实际计算中可以忽略.否则,必须考虑 \bar{G}_{diff} 的影响,详细分析可参考文献[8]和[9].

将式(9)在开口面上离散、积分,可得另一线性方程组

$$[L]\{H\} = \{b^s\} + [P^s]\{E\} \quad (10)$$

将方程(5)与方程(10)联立,得到一组完备的线性方程组

$$\begin{bmatrix} K & \bar{D} \\ -P^s & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ b^s \end{Bmatrix} \quad (11)$$

求解方程组(11)可得出腔体开口面上的电场切向分量(等效磁流)和腔体或槽缝开口面的散射场。

3 数值结果

为了验证 edge-based FEM 方法在计算槽缝和腔体雷达散射截面上的精确性和有效性,本文首先给出了一个在无穷接地导体板上的矩形开口腔体的计算实例。开口腔体长和宽分别为 0.7 和 0.1,深度为 1.73。在 $inc = 40^\circ$ 时,其 VV 极化和 VH 极化背向 RCS 曲线如图 2 所示,通过与矩量法(MoM)得到的数据进行比较,可以看到,两种方法的结果吻合得很好。

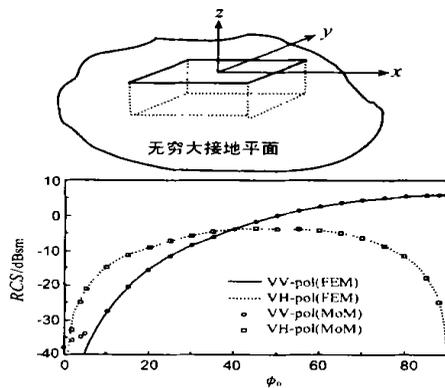


图 2 一个空腔(长为 0.7,宽为 0.1,深度为 1.73, $inc = 40^\circ$)的背向雷达散射截面

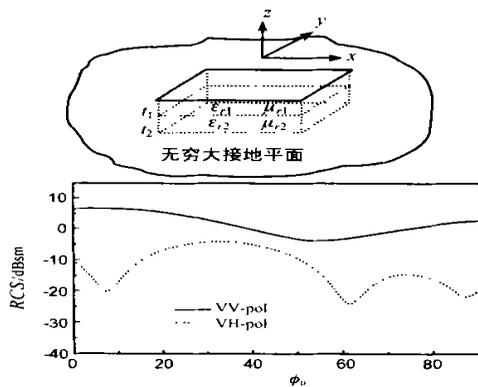


图 3 介质填充开口腔体的背向雷达散射截面

本文还给出了一种填充不同介质的三维开口腔体的 RCS 计算曲线,如图 3 所示。图中开口腔体的尺寸为长 0.8、宽 0.4、深 1.2,分别填充 $\epsilon_{r1} = 2.52$ 、 $\epsilon_{r2} = 4.0$ 、 $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1.0$ 的媒质,填充厚度 $t_1 = t_2$,入射角 $inc = 40^\circ$,采用 edge-based FEM,每波长剖分为 10 段,共有 2304 个四面体单元、3240 条边,运

用稀疏矩阵的压缩存储和求解技术,在 Pentium 433 微机上一个角度 ϕ 的计算时间约为 30 秒。

作为上述 FEM/PO-PTD 方法的应用实例,本文给出了两个带有槽缝的三维实际结构电大尺寸目标电磁散射问题的算例,其结构如图 1 所示,槽缝位于方柱上方中央,电大尺寸导体为 $a=5.0$ 、 $b=10.0$ 、 $c=5.0$,槽缝尺寸在 x 、 y 、 z 方向上分别为 0.2、3.0、0.25。图 4 所示为槽缝内不填充介质时,入射角 $\phi=0^\circ$ 、 $\theta=0^\circ$ 时槽缝中段口面 x 方向等效磁流曲线和入射角 $\phi=0^\circ$ 、 $\theta=0^\circ-180^\circ$ 的 VV 极化背向 RCS 曲线。图 5 所示为槽缝内双层有耗介质填充时的等效磁流曲线和 VV 极化背向 RCS 曲线(入射波角度同图 4),其中上层: $\epsilon_{r1} = 7.0 - j1.5$ 、 $\mu_{r1} = 1.8 - j0.1$ 、填充厚度为 $t_1 = 0.125$,下层: $\epsilon_{r2} = 3.0 - j0.05$ 、 $\mu_{r2} = 2.0$ 、填充厚度为 $t_2 = 0.125$,入射角 $\phi=0^\circ$ 、 $\theta=0^\circ-180^\circ$ 。由于采用 PO-PTD 方法计算电大尺寸目标的散射场,因而计算所需时间与电大尺寸目标的电尺寸无关。同时,由上述理论分析可以得知,电大尺寸目标和电小尺寸腔体或槽缝的散射场分析计算,存在一定的独立性,因而只需对 edge-based FEM 的剖分算法作一定修改,本文混合方法可应用于电大尺寸目标上的任意形状的腔体或槽缝。

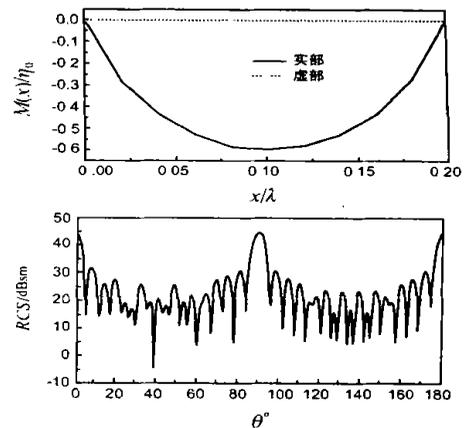


图 4 带有空槽缝三维目标等效磁流和单站 RCS 曲线

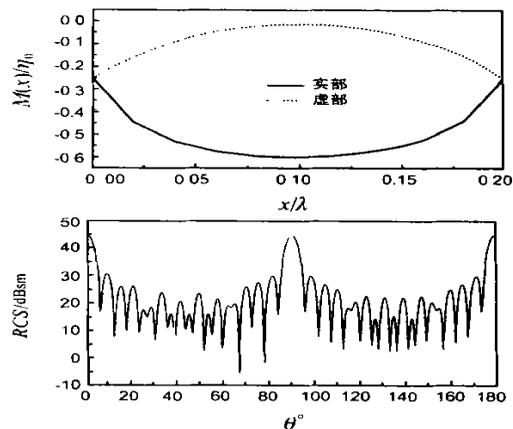


图 5 带有双层介质填充槽缝三维目标等效磁流和单站 RCS 曲线

4 结论

本文提出了一种将 FEM 与 PO-PTD 方法耦合在一起的混合技术,并应用于分析计算带有腔体或槽缝的电大尺寸复杂目标的电磁散射问题.此方法应用等效原理将原有问题分解成内问题和外问题,外问题采用 PO-PTD 方法进行计算,而内问题采用 edge-based FEM 进行分析.利用腔体或槽缝开口面上场的连续性条件,将内、外问题耦合起来.典型算例的结果与有关文献的数据相比较,一致性很好,从而验证了此方法的准确性.本文还给出了另外几种结构的三维开口腔体雷达截面的计算结果以及三维复杂目标计算实例.理论分析与数值计算表明,本文提出的混合方法与其它方法相比,在计算同类问题时能节省计算机存储单元、提高计算速度.此混合方法可推广应用于各种更为复杂的电大尺寸目标(例如背腔式微带天线等结构)的电磁散射特性分析.

参考文献:

- [1] E F 克拉特,等. 雷达散射截面—预估、测量和减缩 [M]. 北京:电子工业出版社,1988.
- [2] R F 哈林登. 计算电磁场的矩量法 [M]. 北京:国防工业出版社,1981.
- [3] 曹世昌. 电磁场的数值计算和微波的计算机辅助设计 [M]. 北京:电子工业出版社,1989.
- [4] J M Jin, Sean S Ni, Shung-Wu Lee. Hybridization of SBR and FEM for scattering by large bodies with cracks and cavities [J]. IEEE Trans, 1995, AP-43(10):1130-1139.
- [5] 聂小春,葛德彪,等. 计算开槽电大目标电磁散射的 IPO-MbM 混合法 [J]. 西安:西安电子科技大学学报,1999,26(1):13-17.

- [6] 金建铭. 电磁场有限元方法 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1998.
- [7] S M Rao, G K Gøthard, D R Wilton. Application of finite-integral technique to electromagnetic scattering by two-dimensional cavity-backed aperture in a ground plane [J]. IEEE Trans, 1998, AP-46(5):679-685.
- [8] E P Ekelman, G A Thiele. A hybrid technique for combining moment method treatment of wire antennas with the GID for the curved surfaces [J]. IEEE Trans, 1980, AP-28(7):813-839.
- [9] L W Henderson, G A Thiele. A hybrid MM-GID technique for treatment of wire antennas near a curved surfaces [J]. IEEE Trans, 1982, AP-30(4):1257-1261.

作者简介:



丁卫平 男,1967 年生于江西,1989 年和 1995 年在南京航空航天大学 and 解放军通信工程学院分别获得学士和硕士学位,现为南京航空航天大学博士研究生. 目前主要研究方向为电磁场数值计算和电磁散射等.



徐金平 男,1962 年生于江苏,1990 年在东南大学获博士学位,现为东南大学毫米波国家重点实验室教授,博士生导师. 主要从事计算电磁学、天线与电磁散射、毫米波理论与技术、电磁兼容领域的研究.