

## 金属/介质涂覆的 S 形扩压器电磁散射特性\*

王龙 钟易成<sup>†</sup> 张堃元

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

(2012 年 3 月 31 日收到; 2012 年 5 月 24 日收到修改稿)

进气道作为飞机强散射源之一, 准确评估其雷达散射截面 (RCS) 特性一直是当今计算电磁学的研究热点. 研究了一种加入阻抗边界条件、前后向迭代的迭代物理光学法, 提出一种箱体分割法用于处理几何消隐工作. 通过软件开发实现任意金属/介质腔体 RCS 特性评估, 并用相关算例校验软件准确性. 在此基础上应用该软件对金属/涂敷介质矩形 S 弯扩压 5 器进行数值模拟, 获得了扩压器在入射波长 0.03 m 下的 RCS 变化规律. 改进后的迭代物理光学法适用于任意腔体改型和涂敷吸波材料研究, 缩短设计周期.

**关键词:** S 弯扩压器, 电磁散射, 迭代物理光学法, 阻抗边界条件

**PACS:** 41.20.Jb, 41.20.-q

## 1 引言

国外隐身技术及材料研究始于第二次世界大战期间, 起源于德国, 后在美国、英、法、俄罗斯及日本等军事发达国家得到迅猛发展. 隐身技术主要包括雷达隐身、红外隐身等. 红外隐身发展的高峰期在 20 世纪 70 年代, 后在 20 世纪 80 年代隐身技术研究的重心逐渐转入雷达散射截面的研究<sup>[1]</sup>. 吸波材料可以依赖本体材料的损耗来吸收投射到它表面的电磁波能量, 并转变为热能<sup>[2]</sup>. 美军现已装备的 F-22, F-35 先进战斗机均采用不同类型的吸波材料, 俄罗斯的 S-37 战斗机同样也采用先进的隐身设计与隐身材料.

进气道中的 S 形扩压器作为飞机的强散射源之一, 其电磁特性已引起飞机设计人员的重视. 但通过数值计算方法对进气道雷达散射截面 (radar cross-section, RCS) 评估还存在一定难度. 低频算法要求网格特征尺寸小于入射波长的 1/10, 因此计算资源需求会随波长减小而增加, 对飞机全尺寸进气道这种大尺寸腔体, 其网格量要求约为千万乃

至亿级, 很少有资源满足其计算要求. 石磊等<sup>[3,4]</sup>采用试验及低频算法 FDTD 对缩尺金属蛇形进气道进行过相关研究<sup>[4,5]</sup>, 其数值模拟网格量约在千万量级.

物理光学法及各种射线类方法不能正确反映电磁波在腔体内的传播过程, 从而影响其计算精度. 对于介质涂覆计算, 上述方法的问题同样存在, 且国内外关于介质涂覆 S 形扩压器研究的公开文献较少.

高频算法中的迭代物理光学法 (iterative physical optics, IPO) 能够求解任意形状腔体, 该方法首先由 Basteiro 与 Burkholder 提出<sup>[5]</sup>, 用于金属腔体的 RCS 求解, 得到令人满意的结果; 随后 Fu Basteiro<sup>[6,7]</sup>引入阻抗边界条件对原始的 IPO 方法进行改进, 拓展至可以处理介质涂敷的问题. 该方法由几何消隐和迭代计算两部分组成, 近年来关于该方法的改进主要围绕迭代计算部分展开, 如采用前后向迭代法、快速远场估计技术等<sup>[8,9]</sup>. 本文在已有的 IPO 算法的基础上, 采用箱体分割法加速几何消隐工作. 研究表明, 改进后的 IPO 方法可准确快捷分析任意有/无涂敷隐身材料的 S 弯扩压

\* 成都飞机设计所联合基金资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: nuaawl@126.com

器模型电磁散射特性.

## 2 计算方法

### 2.1 阻抗边界条件

与金属表面仅存在电流不同, 涂敷介质后会同时存在电流、磁流. 为简化由薄层介质产生的磁流贡献, 文献 [6, 7] 引入阻抗边界条件, 如 (1) 式所示:

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}_a) = -\eta \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}_a), \quad (1)$$

式中  $(\mathbf{r}_a)$  为空间任意点的位置矢量,  $\mathbf{M}(\mathbf{r}_a)$  表示该点的磁流矢量,  $\eta$  为涂覆的介质等效阻抗,  $\mathbf{J}(\mathbf{r}_a)$  为该点的电流矢量,  $\hat{\mathbf{n}}$  为该点法矢量. 其中等效阻抗表达式为

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon - j\sigma/\omega}}, \quad (2)$$

其中  $\varepsilon$  表示介电常数,  $\mu$  表示磁导率,  $\sigma$  表示导电率,  $\omega$  为圆频率. 在工程应用中, 有厚度的薄层介质 [10] 其阻抗一般采用 (3) 式计算:

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_0 \eta_s, \\ \eta_s &= j \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tan(kt \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\eta_0$  表示自由空间波阻抗,  $\eta_s$  表示等效阻抗比,  $\varepsilon_r$  表示相对介电常数,  $\mu_r$  表示相对磁导率,  $k$  表示自由空间波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $t$  表示介质层厚度.

### 2.2 理论分析

迭代物理光学法的理论思想可简述为: 当电磁波照射金属物体时, 物面受电磁波激励将产生电流, 以此物面电流为初始电流, 利用磁场积分方程 [5] 迭代计算壁面电流, 从而逼近真实的表面电磁流. 当金属物体表面涂覆隐身材料时, 则前述电流为电磁流. 该方法在物理光学法的基础上考虑到电流之间相互的影响, 可较为真实地描述物理现象的本质. 与其他高频算法相比, 迭代物理光学法计算精度明显提升, 在腔体计算方面尤其具有优势. 现已渐成为大尺寸腔体电磁散射计算的主要方法之一. 迭代物理光学法计算流程如图 1 所示.

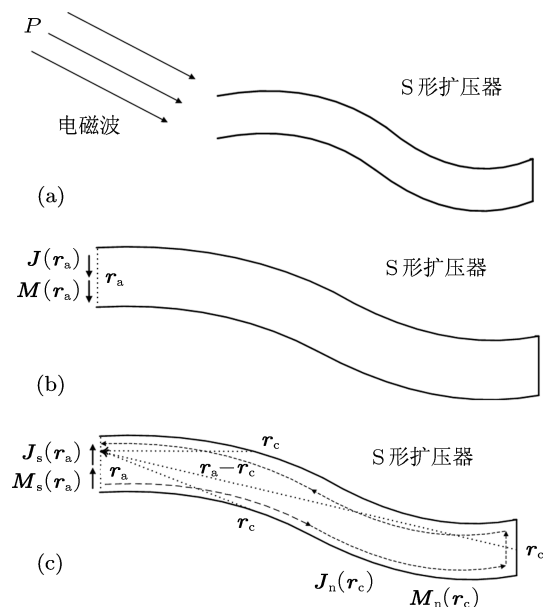


图 1 IPO 方法求解步骤 (a) 扩压器电磁散射问题; (b) 进口等效面电磁流; (c) 求解壁面的电磁流

1) 进口面上产生等效电流  $\mathbf{J}(\mathbf{r}_a)$  与等效磁流  $\mathbf{M}(\mathbf{r}_a)$ ,  $\mathbf{r}_a$  为等效面网格单元上任一位置矢量, 如图 1(a), (b) 所示.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\mathbf{r}_a) &= \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^i(\mathbf{r}_a), \\ \mathbf{M}(\mathbf{r}_a) &= \mathbf{E}^i(\mathbf{r}_a) \times \hat{\mathbf{n}}. \end{aligned} \quad (4)$$

2) 利用基尔霍夫公式求出腔体内壁面上初始电流.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{r}_c) &= \int_{S_a} \mathbf{J}(\mathbf{r}_a) \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_a \\ &+ \frac{1}{jk\eta} \nabla \times \int_{S_a} \mathbf{M}(\mathbf{r}_a) \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_a. \end{aligned} \quad (5)$$

在使用 (5) 式计算时, 对第二项  $\frac{1}{jk\eta} \nabla \times \int_{S_a} \mathbf{M}(\mathbf{r}_a) \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_a$  需要进行特殊处理, 考虑到梯度与旋度的表达式中具有相同的微分算符, 受计算流体力学 (CFD) 梯度重构 [11, 12] 思想启发, 本文提出一种称为旋度重构的方法. 对于待求点  $\mathbf{0}$ , 与其相连的第  $i$  点具备以下关系:

$$(\nabla F_j)_0 \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0)_j = (F_i - F_0)_j, \quad (6)$$

列出与  $\mathbf{0}$  点相连点的关系式, 可以组合成  $\mathbf{Ax} = \mathbf{B}$  的形式, 其中  $j$  表示  $x, y, z$  3 个方向, 则  $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{B})$ . 在求出矢量  $\mathbf{F}$  其他方向梯度后可得旋度.

3) 采用磁场积分方程与阻抗边界对腔体壁面面元电流进行迭代.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{J}_N(\mathbf{r}_c) = & 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_a^i(\mathbf{r}_c) + 2\mathbf{n} \times \oint_{S_c} \mathbf{J}_{N-1}(\mathbf{r}'_c) \\
 & \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}'_c) dS'_c + \frac{1}{jkZ} \cdot 2\mathbf{n} \\
 & \times \nabla \times \oint_{S_c} \mathbf{M}_{N-1}(\mathbf{r}'_c) \\
 & \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}'_c) dS'_c,
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{M}_N(\mathbf{r}_c) = -\eta \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{J}_N(\mathbf{r}_c), \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_0(\mathbf{r}_c) = \begin{cases} 2\hat{\mathbf{n}} \times \vec{\mathbf{H}}_a^i(\mathbf{r}_c) & \text{明区,} \\ 0 & \text{暗区,} \end{cases} \quad (8)$$

(7) 式第一项表示该面元的物理光学电流, 第二项表示壁面电流对该面元的作用, 第三项表示壁面磁流对该面元的作用. (7) 式的后两项考虑了面元之间的相互电磁影响, 宏观上描述出电磁波在腔体内多次反射的现象. 迭代过程中残值定义为

$$\left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n J_i^N(\mathbf{r}_c)}{\sum_{i=1}^n J_i^{N-1}(\mathbf{r}_c)} \right|,$$

$n$  为壁面面元总数,  $N$  表示迭代次数. 当迭代达到指定残值后 (如小于 0.1), 可采用 (9) 式求解进口等效面上的散射电场和磁场 [13], 如图 1(c) 所示.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_s(\mathbf{r}_a) = & \int_{S_w} \mathbf{J}_w \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_w \\
 & + \frac{1}{jk\eta_0} \nabla \times \int_{S_w} \mathbf{M}_w \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_w, \\
 \mathbf{E}_s(\mathbf{r}_a) = & - \int_{S_w} \mathbf{M}_w \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_w \\
 & + \frac{\eta_0}{jk} \nabla \times \int_{S_w} \mathbf{J}_w \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_w.
 \end{aligned} \quad (9)$$

此时雷达观测点  $P$  (参见图 2) 的散射电场由 (10) 式给出:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}(P) = & - \int_{S_a} \mathbf{M}_a \times \nabla G(\mathbf{r}_a - P) ds_a + \frac{\eta_0}{jk} \nabla \\
 & \times \int_{S_a} \mathbf{J}_a \times \nabla G(\mathbf{r}_a - P) ds_a. \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\text{RCS 公式 RCS 定义为: } \sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2},$$

可得某一角度下的单站 RCS, 该式中的散射电场  $\mathbf{E}^s$  即为式 10 中的  $\mathbf{E}(P)$ ,  $\sigma$  常表示为对数形式, 即相对于一平方米的分贝数  $\sigma_{\text{dBsm}} = 10 \lg_{10}(\sigma)$ , 其无量纲形式表示为  $\sigma_{\text{dB}\lambda} = 10 \lg_{10}(\sigma/\lambda^2)$ .

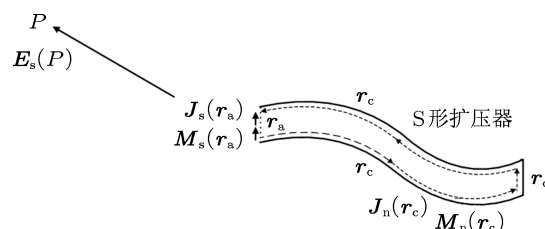


图 2 观测点  $P$  处散射电场计算

### 2.3 前后向迭代及程序开发

在磁场积分方程迭代过程中, 所采用的前后向迭代法与计算流体力学中的隐式迭代 LU-SGS (lower-upper symmetric-Gauss-seidel) 方法 [14,15] 非常类似, 具体内容参见文献 [8]. 该方法操作步骤为沿着波的传播方向把壁面网格单元按一定的顺序重排序, 在迭代的过程中先进行前向迭代 (序号从 1 到  $N$ ), 序号比该点小的网格单元其电流采用迭代后电流, 序号比该点大的网格单元其电流采用迭代前电流, 直到该次迭代结束; 随后进行后向迭代 (序号从  $N$  到 1), 序号比该点大的网格单元其电流采用后向迭代后的电流, 序号比该点小的网格单元其电流采用前向迭代后的电流, 其矩阵形式如 (11) 式所示, 完成前后向迭代后分别统计残值, 即为 1 次前后向迭代过程结束.

$$\begin{aligned}
 \text{前向: } & (D + L)J^{k+0.5} = V - UJ^k, \\
 \text{后向: } & (D + L)J^{k+1} = V - LJ^{k+0.5}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

IPO 方法计算流程图如图 3 所示. 对网格的面元之间进行几何消隐工作, 读入入射波长、极化方式、散射角度等参数文件计算, 使用阻抗边界条件处理介质问题, 前后向迭代可加速收敛, 当迭代达到指定的精度时, 进行下一角度计算, 所有散射角计算完成后输出 RCS 曲线, 壁面电流模值可通过文件方式输出显示.

### 3 算例验证

图 4 为一深单端开口直腔体 RCS 计算结果, 几

何尺寸直径为 25.4 cm, 长度为 76.2 cm, 面元剖分密度为 9 个三角面元/平方波长, 入射波长为 3 cm<sup>[8]</sup>. 该算例不需消隐, 可考核软件的电磁仿真及 RCS 计算结果准确性. 从图中可以看出本文计算结果与与文献结果符合良好, 并且在入射波 ( $\theta\theta$  极化方式) 角度偏折较大的时候, 本软件计算结果更接近模式法, 略优于文献计算结果. 该算例也表明对于工程问题, 面元剖分密度为 9 个三角面元/平方波长即可满足计算精度要求.

图 5(a) 给出了入射电磁波  $60^\circ$  时  $\varphi\varphi$  极化下金属腔体电流模值分布, 从该图可以看出其电流较大值只集中在腔体迎着来流入射波位置处, 随后经过一次反射, 在腔体较低的位置迅速减小. 图 5(b) 为不同迭代方式下残值收敛曲线, F-B 为文献 [8] 作者的前后向迭代法结果, G-J 为高斯-雅克比迭代结果. 值得说明的是, 本文没有采用松弛因子, 其收敛曲线与文献并不完全重合, 但仍与文献 [8] 收敛速度相当.

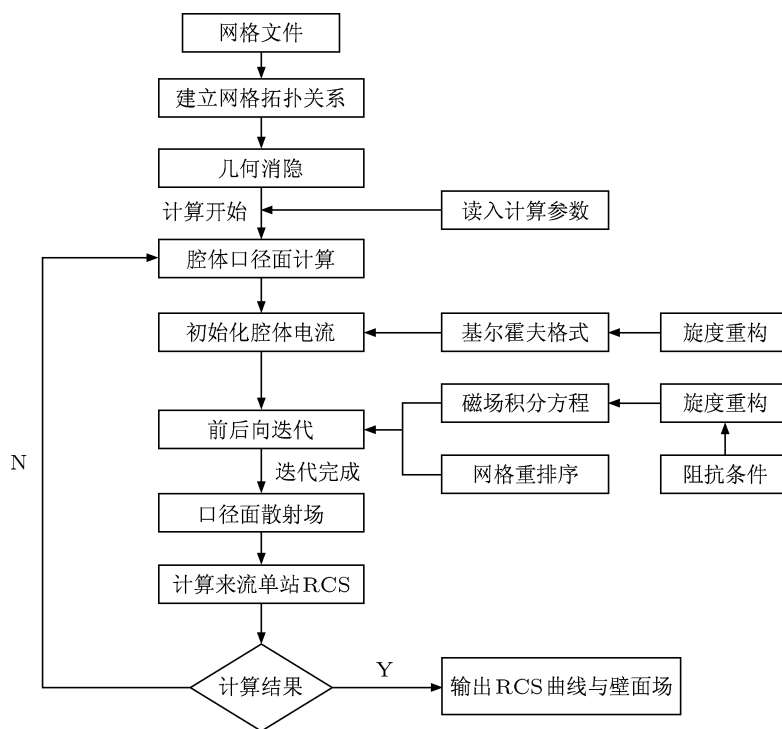


图 3 IPO 方法计算流程图

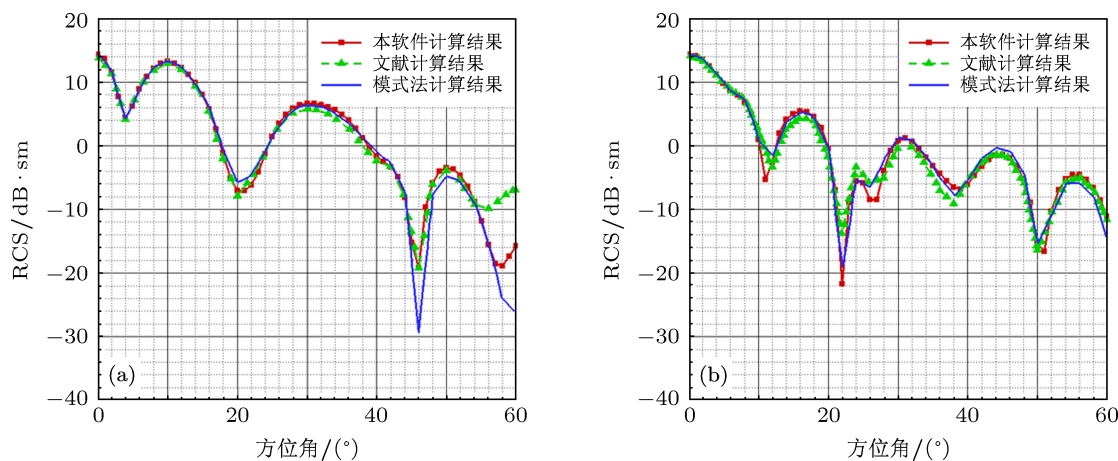


图 4 金属深腔体 RCS 曲线 (a)  $\theta\theta$  极化; (b)  $\varphi\varphi$  极化

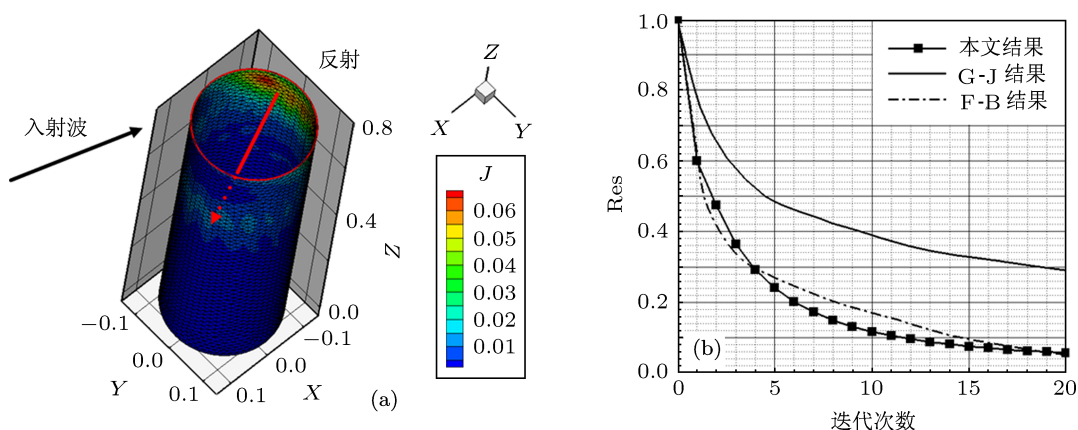


图5 壁面电流云图及迭代收敛历程 (a) 壁面电流分布; (b) 不同迭代方法收敛历程

采用直径 12 cm, 长度 12 cm 单端开口的腔体标准算例对所开发软件的介质计算模块进行验证, 入射波长为 3 cm. 对上述模型进行面元剖分, 网格数为 1202 个三角面元, 相当于每平方波长 16 个三角面元, 模型及网格剖分如图 6 所示.

图 7 为该金属腔体涂敷介质的计算结果, 其等效阻抗比  $\eta_s = 0.0797 - j0.0050$ , 网格数与金属腔体相同. 两种极化方式下本文计算结果与文献 [10, 16] 符合良好, 验证了本程序对介质涂敷腔体计算精确性.

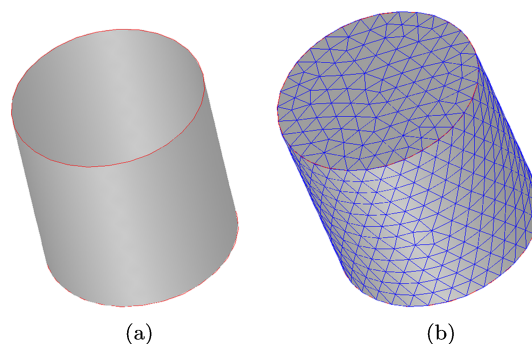


图6 单端开口金属腔体模型及网格示意图 (a) 单端开口的腔体; (b) 网格

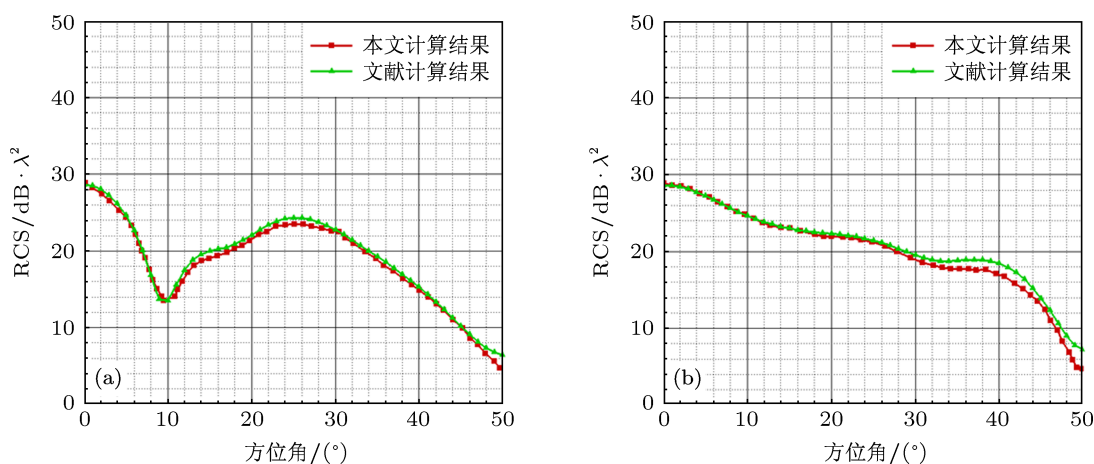


图7 介质涂敷腔体 RCS 曲线 (a)  $\theta\theta$  极化; (b)  $\varphi\varphi$  极化

图 8 为有/无介质涂敷腔体的 RCS 对比结果, “case1”为模式法计算金属腔体结果, “case2”为本软件计算金属腔体结果, “case3”为本软件计算腔体介质涂敷的结果. 从图中 case1 与 case2 的曲

线对比看出, 本文对金属腔体的计算结果与模式法结果 [5] 符合极好, “case2”与“case3”的曲线对比表明在两种极化方式下涂敷介质均可降低其 RCS 值.

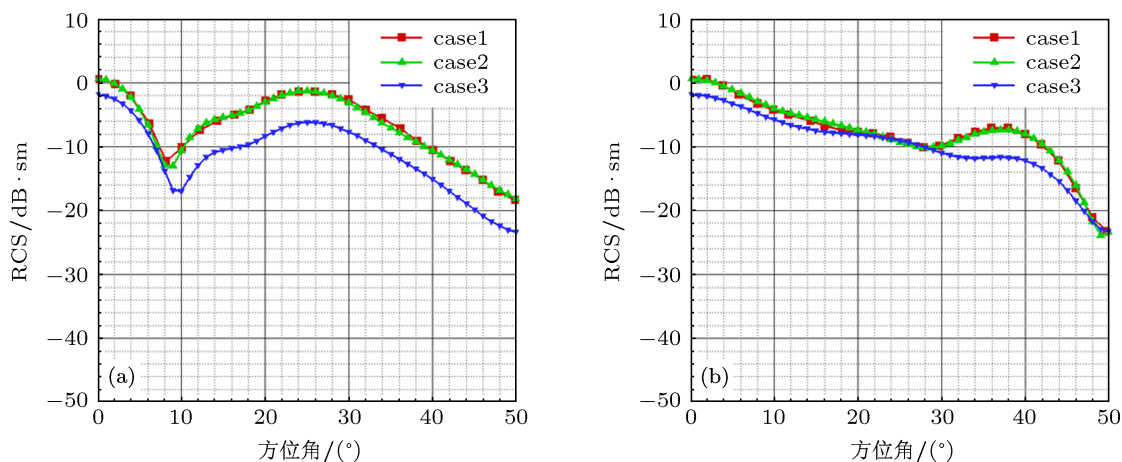


图8 有/无介质涂敷腔体 RCS 曲线 (a)  $\theta\theta$  极化; (b)  $\varphi\varphi$  极化

### 4 S 弯扩压器电磁散射分析

对于 S 弯扩压器腔体结构物体, 由于其面元之间会相互遮挡, 尚需对其进行消隐处理.

#### 4.1 箱体分割消隐算法及验证

箱体分割法的具体措施为: 把任意腔体计算域在三个  $X, Y, Z$  坐标方向分成  $N_x, N_y, N_z$  等分, 则形成  $N_x \times N_y \times N_z$  个箱体. 将已剖分好的几何物体网格面元分配到对应箱体中, 记录非空的箱体编号. 几何消隐操作时, 先判断箱体与箱体之间的遮挡关系. 如可视则判断箱体内部某面元是否与“可视”箱体相交, 如果不相交, 则从该面元中心发射出的射线必然和围成该箱体内部的所有曲面均不相交; 如果射线和“可视”箱体相交, 则需要进一步判断“可视”箱体内部的所有面元和射线相交情况. 重复上述过程, 完成消隐工作, 该方法大大缩减总计算耗时. 图 9 为某型 S 弯扩压器消隐结果图, 图 9(a) 表示 S 弯扩压器腔体面网格对进口面上某一红色面元可视情况, 腔体绿色区域为可见区域, 蓝色区域为不可见区域. 图 9(b) 为 S 弯扩压器壁面之间的消隐结果, 绿色区域为可见区域, 蓝色区域为不可见区域, 从图中可以看出本程序消隐结果正确.

#### 4.2 金属/涂敷介质 S 弯扩压器

为检验本软件计算 S 弯扩压器 RCS 的准确性, 设计一方形扩压器, 分别采用本软件和商业

软件 Feko 对其数值模拟. 图 10 给出了计算模型示意图及模型中分面、进出口面均为宽 11 cm、高 8.4 cm 正方形, 进出口面垂直距离为 43.6 cm, 面元网格剖分密度约为 9 个三角面元/平方波长.

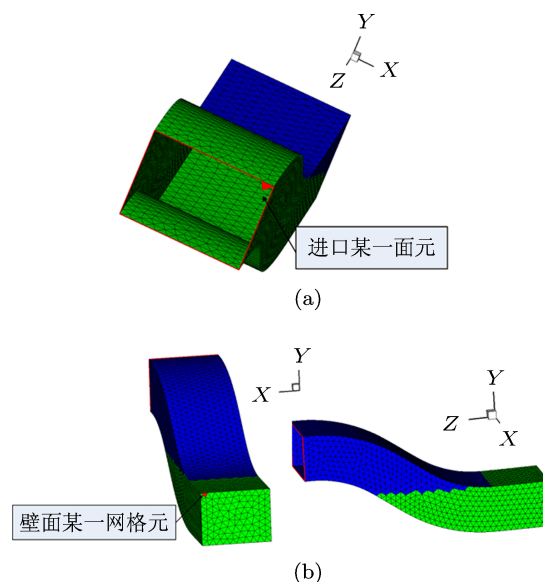


图9 某 S 弯扩压器消隐示意图 (a) 进口面元与壁面遮挡关系; (b) 面元遮挡关系

计算环境: 操作系统为 Win-Xp, CPU 型号 P4 3.0G, 内存 2 G. 计算角度范围为  $0-50^\circ$ , 该角度为隐身敏感区域, 计算间隔为  $1^\circ$ , 电场极化方式为  $\theta\theta$  极化, 入射频率约为 10 GHz. 计算时间和计算资源的对比如表 1 所示, 其中 IPO 表示传统消隐方法处理消隐, 总耗时约为 3.45 机时, 几何消隐时间约占 2.6 机时; IPO-B 表示采用箱体分割法处理消隐, 计算总耗时约为 2.1 机时, 几何消隐

时间约占 1.25 机时; Feko 采用 MLFMM 方法加速计算, 耗时约为 6.4 机时. 对比可以看出, 采用箱体分割法处理消隐, 虽然内存占用会略有增

加, 但总耗时却明显减小, 约为原算法的 48.1%. 这种效率上的提升在大尺寸结构腔体计算时会愈加明显.

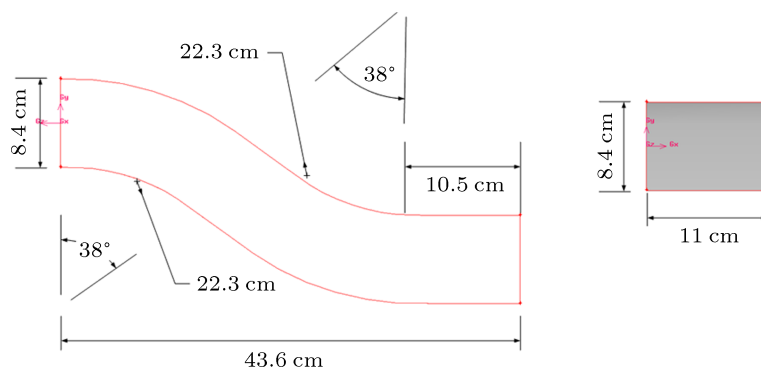


图 10 方形 S 弯扩压器模型示意图

从图 11 可以看出, 在  $0\text{--}40^\circ$  范围内 IPO 计算结果与 Feko 结果符合较好, 可精确预测 S 弯扩压器 RCS 二次峰谷值. 而  $40\text{--}50^\circ$  计算结果开始出现差异, 原因如下: IPO 方法是针对腔体内部 RCS 进行评估, 而矩量法是对整个腔体的内外表面进行计算, 在入射电磁波达到  $40^\circ$  以后, 由扩压器后半部的上表面产生的镜面散射会占据主导地位, 此时两种方法的结果差异会愈加明显, 本软件计算结果也反映出这一变化趋势. 但值得说明的是, 现代先进隐身战斗机的进气道均采用埋入机身方式设计, 在这种情况下雷达发射的探测电磁波不可能照射到扩压器外表面, 因此本方法更能体现出对现代战机中扩压器 RCS 评估的准确性.

和  $0.25 - j0.0675$ .

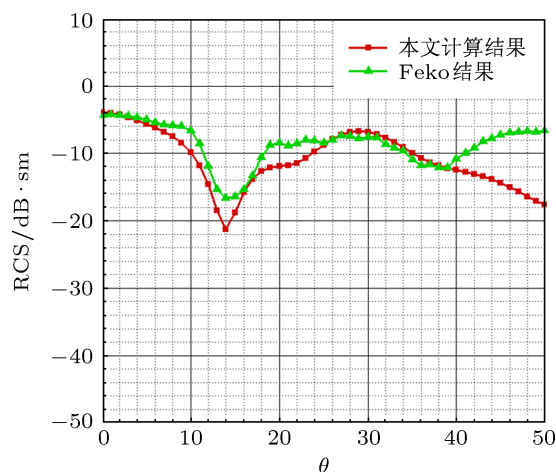


图 11 S 形扩压器 RCS 曲线

表 1 计算时间与资源对比

	内存/Mb	内存/%	CPU 时间/h	CPU 时间/%
IPO	15	6.9	3.45	54
IPO-B	22	10	2.1	32.8
Feko	220	100	6.4	100

本文选取的介质材料特性为: 材料 1 的相对磁导率  $\mu_r = 1.01 - j1.07$ , 相对介电常数  $\epsilon_r = 13.73 - j0$ ; 材料 2 的相对磁导率  $\mu_r = 1.29 - j0.57$ , 相对介电常数  $\epsilon_r = 9.72 - j1.08^{[17]}$ . 该材料适用于  $8\text{--}12\text{ GHz}$  频带范围, 涂层厚度取为  $2\text{ mm}$ , 其等效阻抗比由 (3) 式计算, 分别为  $0.2837 - j0.1026$

图 12 为涂敷不同介质方形 S 弯扩压器在不同平面的 RCS 曲线图 ( $\theta\theta$  极化方式), case1 为金属腔体计算结果, case2 为涂覆等效阻抗比为  $0.2837 - j0.1026$  介质的腔体, case3 为涂覆等效阻抗比为  $0.25 - j0.0675$  介质的腔体. 从结果可以看出, 在相当大的角度范围下, 介质可使扩压器保持低 RCS 水平, 可使原高波峰显著降低, 且不存在明显的高峰. 此外还可看出, 在两种不同的极化方式下均存在一个较小的角度范围内使得涂覆介质扩压器的 RCS 值表现出略微上升的现象.

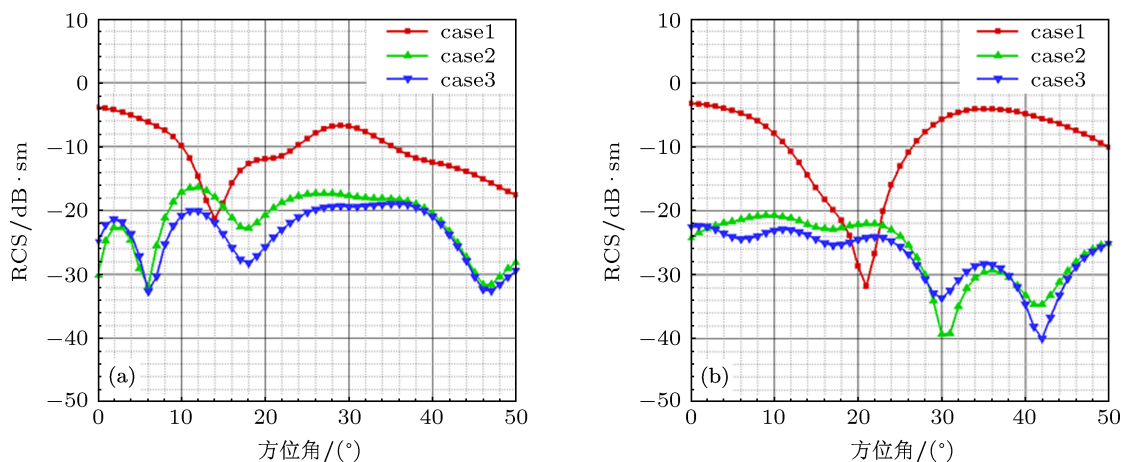


图 12 涂敷不同介质 S 弯扩压器 RCS 曲线 (a) 侧滑角平面; (b) 攻角平面

## 5 结论

本文研究了适用于有/无涂覆介质进气道扩压器的迭代物理光学法, 主要结论如下.

1) 在 IPO 方法基础上引入阻抗边界条件; 采用前后向迭代方法改善了计算收敛性; 引入箱体分割法消隐技术解决了 S 弯扩压器面元相互遮挡及影响的问题, 提高处理效率; 通过若干算例验证了本软件准确性、高效性及稳定性.

2) 对某型 S 弯扩压器进行数值仿真, 其 RCS 结果与矩量法计算结果符合良好, 计算时间约为其 32.8%, 内存消耗约为 10%; 对涂敷不同介质的 S 弯扩压器数值模拟, 结果表明合理选择介质可显著降低扩压器 RCS.

3) 改进后的 IPO 方法可较准确地评估任意腔体电磁特性, 为有/无涂覆介质扩压器等腔体快速评估提供了有力的计算方法和工具, 缩短设计周期.

- [1] Wang H Q, Cheng X Q 2003 *Materials Review* **9** 170 (in Chinese) [王海泉, 陈秀琴 2003 材料导报 **9** 170]
- [2] Zhang W D, Feng X Y, Meng X L 2000 *Aerospace Materials and Technology* **3** 1 (in Chinese) [张卫东, 冯晓云, 孟秀兰 2003 宇航材料工艺 **3** 1]
- [3] Shi L, Guo R W 2007 *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* **28** 1296 (in Chinese) [石磊, 郭荣伟 2007 航空学报 **28** 1296]
- [4] Shi L, Guo R W 2008 *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* **29** 1098 (in Chinese) [石磊, 郭荣伟 2008 航空学报 **29** 1098]
- [5] Obelleiro-Basteiro F, Rodriguez J L, Burkholder R J 1995 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **43** 356
- [6] Araújo M G, Obelleiro F, Rodriguez J L 2002 *Wireless Personal Communications* **20** 237
- [7] Obelleiro F, Araujo M G, Rodriguez J L 2001 *Micro. Opt. Tech. Lett.* **28** 21
- [8] Burkholder R J, Lundin T 2005 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **53** 793
- [9] Holliday D, de Raad L L, St-Cyr G J 1996 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **44** 722
- [10] Tadokoro M, Hongo K 2002 *IEICE Trans. Electron.* **85** 1692
- [11] Barth T J 1993 *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 31st, Reno, NV, Jan. 11–14, 1993 668
- [12] Barth T J, Samuel W L 1995 *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 33rd* Reno, NV, Jan. 9–12, 1995 p221
- [13] Henmon R, Pouliguen P, He H, Saillard J, Damiens J F 2008 *IEEE Trans. Progress in Electromagnetic Research* **80** 77
- [14] Wu Q, Zhong Y C, Hu J, Yu S Z 2009 *IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* Wuhan, China, Mar. 28–30, 2009 p839
- [15] Wu Q, Zhong Y C, Yu S Z, Hu J 2009 *Chinese Journal of Computational Physics* **26** 60 (in Chinese) [吴晴, 钟易成, 余少志, 胡骏 2009 计算物理 **26** 60]
- [16] Gong Y M 2008 *Journal of Magnetic Materials and Devices* **6** 28 (in Chinese) [巩英明 2008 磁性材料与器件 **6** 28]
- [17] He S, Xiong K M 1993 *Journal of Aeronautical Materials* **14** 43 (in Chinese) [何山, 熊克敏 1993 航空材料学报 **14** 43]



# Electromagnetic scattering study for metal/dielectric coated inlet diffuser\*

Wang Long Zhong Yi-Cheng<sup>†</sup> Zhang Kun-Yuan

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(Received 31 March 2012; revised manuscript received 24 May 2012)

## Abstract

As one of strong scattering sources of planes, assessing accurately the characteristic of radar cross-section (RCS) about inlets is still hot in investigation into computational electromagnetics. An iterative physical optics method, which an impedance boundary condition and forward-backward method are added to, is studied and a box-segmentation method of blanking off is proposed. It can compute accurately the electric magnetic current distribution on the wall and the RCS. What is more, by developing a kind of software which can be verified by the relevant examples, the RCS characteristic of any metal or dielectric cavity can be evaluated. On this basis, using the software, the numerical simulation about the metal/coated medium S-diffuser with rectangular shape is carried out, and the RCS variational regulation of diffuser under an incident wave length in 0.03 m is obtained. The improved iterative physical optics method is applicable to the design of any cavity and the study of coating absorbing materials, therefore the design cycle is shortened.

**Keywords:** S diffuser, electromagnetic scattering, iterative physical optics, impedance boundary conditions

**PACS:** 41.20.Jb, 41.20.-q

---

\* Project supported by the Jointly Fund of AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute.

<sup>†</sup> E-mail: nuaawl@126.com