

# 基于IPO的进气道扩压器电磁散射计算方法

王 龙<sup>1</sup> 钟易成<sup>1</sup> 杨应凯<sup>2</sup> 安 峰<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016; 2. 成都飞机设计研究所, 成都, 610015;  
3. 南京普国科技公司, 南京, 210007)

**摘要:**进气道RCS目标特性在整个飞机中占有较大比例,但作为电大尺寸腔体,其RCS特性评估与外机身相比有其固有困难。本文研究了适合于任意腔体RCS评估的迭代物理光学算法,该方法基于磁场积分方程属于高频算法范畴,可以较精确地计算出进气道金属表面电流矢量分布并给出令人满意的RCS结果。通过软件开发实现了任意腔体RCS特性评估,并用标准算例考核了程序准确性。应用该软件对某型心线一定的金属进气道S弯扩压器开展计算研究,获得了不同宽高比扩压器在入射波长为0.03 m下的电磁散射特性变化规律。

**关键词:**进气道; S弯扩压器; 电磁散射; 迭代物理光学法

**中图分类号:** V231.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2012)04-0438-07

## Electromagnetic Scattering Calculation Method for Inlet Diffuser Based on IPO

Wang Long<sup>1</sup>, Zhong Yicheng<sup>1</sup>, Yang Yingkai<sup>2</sup>, An Feng<sup>3</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu, 610015, China; 3. Nanjing PuGuo Science and Technology Company, Nanjing, 210007, China)

**Abstract:** The RCS target characteristic of inlet has a high percentage in aircraft RCS. However, as inlet is an electrically large cavity, it is inherently difficult to compute its RCS in contrast with that of fuselage. An iterative physical optics (IPO) algorithm for cavity RCS evaluation is investigated based on magnetic field integral equation, subjected to the high frequency algorithm category. IPO can calculate current vector on the metal surface of the inlet more exactly and achieve fairly accurate RCS. Any cavity RCS characteristics can be evaluated applying the software whose accuracy is proved by the standard example. The electromagnetic scattering variation rules of the different width-height ratio diffusers under the incident wave (0.03 m) are obtained by using the software to carry out the calculation of the inlet S-shaped metal diffusers with the same certain line.

**Key words:** inlet; S-shaped diffuser; electromagnetism scatter; iterative physical optics method

RCS是评估飞行器雷达隐身性能的重要指标,随着雷达探测技术的飞速发展,军用飞行器执行任务的生存性受到了极大威胁,其中进气道RCS在全机中占有很大比例<sup>[1]</sup>。飞行器及进气道RCS可通过试验及数值仿真获得,与试验相比,仿真手段评估具有成本低、易实现等优点。由于进气道的

扩压器是电大尺寸腔体,如何提高其RCS评估结果的准确性并缩短仿真周期仍然是当今计算电磁学领域面临的难题。在工程实际中,开发出一种网格量适中(百万量级以下)同时又能保证计算精度、且计算速度较快的计算软件,对提升隐身进气道设计水平及设计效率具有重要意义。

**基金项目:** 成都飞机设计研究所联合基金资助项目。

**收稿日期:** 2011-10-31; **修订日期:** 2011-12-14

**通讯作者:** 钟易成,男,博士,副教授,1970年生, E-mail: nuaa\_zyc\_321@163.com。

电磁散射计算方法可以分为低频算法和高频算法。低频算法包括矩量法<sup>[2]</sup>、有限元、有限差分法<sup>[3-5]</sup>,具有精度高、适用性强的优点;其缺点是为保证计算精度要求网格特征尺寸不大于入射波长的1/10,短波段下全尺寸进气道RCS评估约需数千万至上亿网格,计算代价高昂几乎无法采用。

高频方法一般是指几何光学法、物理光学法、射线法等,其本质是在高频电磁波照射下假设散射体的RCS值只与其表面几何特征及入射波有关,不考虑网格单元间相互影响,因此具有计算快速的优点。这些方法比较适合于外表面(如飞机机体表面)RCS特性评估,但直接用于进气道扩压器等腔体结构RCS分析会导致较大误差,无法满足工程评估要求。

为解决上述问题,Obelleiro等人<sup>[6]</sup>提出一种称为“迭代物理光学法(Iterative physical optics, IPO)”的高频计算方法。该方法融合了低频方法的思想,即基于磁场积分方程,考虑到壁面各电流面元的相互作用,在求解腔体问题上具有较高的准确性,特别适合进气道RCS分析。

至今国外商业电磁计算软件(例如FEKO等)仍没有给出适合腔体快捷精确计算的程序模块,因此对于进气道RCS快速评估来说,自主开发相关软件势在必行。本文研究适合于进气道扩压器RCS评估的迭代物理光学算法<sup>[7-9]</sup>,开发相应的电磁场仿真及RCS特性评估软件。该软件仅需导入模型三角面元网格(可用商业软件Gambit生成)并设置相应计算参数即可进行计算;还可给出模型表面电流强度分布,可直观评估强散射区域,特别有利于设计改型。在此基础上研究不同宽高比扩压器在入射波长为0.03 m下的电磁散射特性变化规律。

## 1 计算方法

### 1.1 IPO原理及计算步骤

IPO法适用于任意腔体(见图1)RCS计算,其本质是在物理光学法(Physical optics, PO)基础上考虑了腔体内电流微元相互作用,通过迭代壁面上的电流以逼近电流真实分布,从而提高计算精度。一般而言远距离雷达发射的电磁波可当做平面波,平面波表达式为 $\mathbf{E}^i(\mathbf{r}_a) = \hat{\mathbf{E}}e^{-jk \cdot \mathbf{r}_a}$ , $\mathbf{r}_a$ 为空间任意某点位置坐标,其中波矢量 $\mathbf{k}$ (见图2)表达式如式(1)所示。

$$\mathbf{k} = (-\sin\theta\cos\varphi)\hat{x} + (-\sin\theta\sin\varphi)\hat{y} + (-\cos\theta)\hat{z} \quad (1)$$

IPO法的原理和计算流程如下:

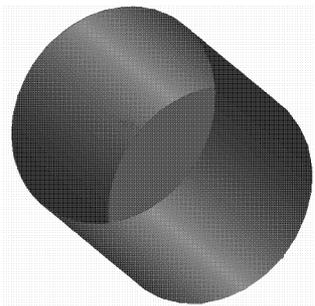


图1 腔体示意图

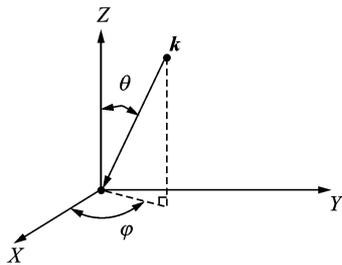


图2 入射波示意图

(1)应用等效原理可得进口面上等效电流 $\mathbf{J}(\mathbf{r}_a)$ 、等效磁流 $\mathbf{M}(\mathbf{r}_a)$ ,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\mathbf{r}_a) &= \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^i(\mathbf{r}_a) \\ \mathbf{M}(\mathbf{r}_a) &= \mathbf{E}^i(\mathbf{r}_a) \times \hat{\mathbf{n}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{r}_a$ 为进口面上某点位置矢量。

(2)根据基尔霍夫公式,求出腔体上初始分布磁场,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{r}_c) &= \int_{S_a} \mathbf{J}(\mathbf{r}_a) \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_a + \frac{1}{jkZ} \nabla \times \\ &\int_{S_a} \mathbf{M}(\mathbf{r}_a) \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_a \end{aligned} \quad (3)$$

第2项 $\frac{1}{jkZ} \nabla \times \int_{S_a} \mathbf{M}(\mathbf{r}_a) \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_a) ds_a$ 可根据张量公式展开,如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) &= (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} - (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B} - \\ &\mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{A}) + \mathbf{A}(\nabla \cdot \mathbf{B}) \end{aligned} \quad (4)$$

(3)针对腔体壁面面元,采用磁场积分方程对其进行迭代。

$$\mathbf{J}_N(\mathbf{r}_c) = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_a^i(\mathbf{r}_c) + 2\mathbf{n} \times \oint_{S_c} \mathbf{J}_{N-1}(\mathbf{r}'_c) \times \nabla G(\mathbf{r}_c - \mathbf{r}'_c) dS'_c \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_0(\mathbf{r}_c) = \begin{cases} 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_a^i(\mathbf{r}_c) & \text{明区} \\ 0 & \text{暗区} \end{cases} \quad (6)$$

其中残值定义 $\text{err} = |1 - \frac{\sum_{i=1}^m J_i^N(\mathbf{r}_c)}{\sum_{i=1}^m J_i^{N-1}(\mathbf{r}_c)}|$ , $m$ 为壁面面元总数,当迭代达到一定残值后(如残值 $\leq 0.1$ )。

腔体内的电流分布趋于稳定。

(4)由壁面电流可求出等效虚拟面的电磁流,再采用式(7)求出雷达处接受的电场<sup>[10]</sup>。

$$E_{\theta}^s(r, \theta, \varphi) = \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} [L_{\varphi}(\theta, \varphi) + ZN_{\theta}(\theta, \varphi)]$$

$$E_{\varphi}^s(r, \theta, \varphi) = \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} [L_{\theta}(\theta, \varphi) - ZN_{\varphi}(\theta, \varphi)] \quad (7)$$

式中:

$$N_{\theta}(\theta, \varphi) = \int_{S_a} [J_x \cos\theta \cos\varphi + J_y \cos\theta \sin\varphi - J_z \sin\theta] e^{jkr \cdot r_a} ds_a$$

$$N_{\varphi}(\theta, \varphi) = \int_{S_a} [-J_x \sin\varphi + J_y \cos\varphi] e^{jkr \cdot r_a} ds_a$$

$$L_{\theta}(\theta, \varphi) = \int_{S_a} [M_x \cos\theta \cos\varphi + M_y \cos\theta \sin\varphi - M_z \sin\theta] e^{jkr \cdot r_a} ds_a$$

$$L_{\varphi}(\theta, \varphi) = \int_{S_a} [-M_x \sin\varphi + M_y \cos\varphi] e^{jkr \cdot r_a} ds_a; \hat{r} \text{ 为}$$

散射单位矢量; $J, M$ 分别为等效面上电流和磁流。

(5)计算RCS,其定义为: $\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2}$ ,常表示为对数形式,即相对于一平方米的分贝数  $\sigma_{\text{dBsm}} = 10 \log_{10} \sigma$ 。

## 1.2 消隐及程序开发

由于IPO方法是基于高频算法原理,在应用该方法计算S弯扩压器时,需要对几何模型进行消隐工作。本文为了验证程序计算的精确性与准确性,采用最基本的消隐算法<sup>[11-12]</sup>。基本过程如下:

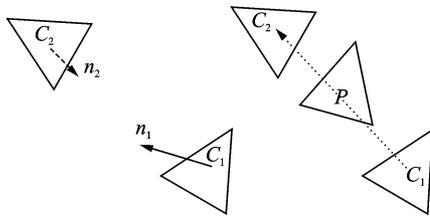
(1)判断两个面元之间是否可以互相照射,如图(3a)所示,如果两个面元可以互相照射,则必须满足  $C_1 C_2 \cdot n_1 > 0$  和  $C_2 C_1 \cdot n_2 > 0$ 。如满足则进行步骤(2)判断,不满足则对下一个壁面网格元进行判断操作。其中  $C_1, C_2$  为面元1和2的形心;  $n_1, n_2$  为面元1和面元2的表面法矢量。

(2)判断面元之间是否被其他壁面遮挡,设  $C_1 C_2$  所在直线和壁面所在的平面的交点为  $P$ ,如果被遮挡需满足  $C_1 P \cdot PC_2 > 0$ ,满足则进行步骤(3)判断;不满足则对下一个壁面网格元进行判断操作。

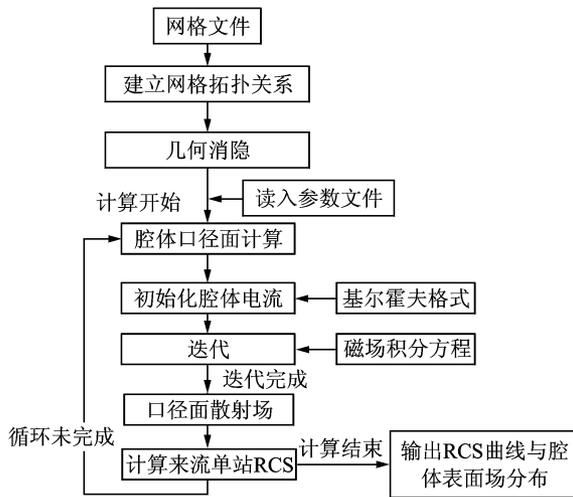
(3)判断交点  $P$  是否在壁面面元内。壁面面元边数为3,每条边的起点为  $Pst_i$ ,终点为  $Plst_i$ ,记  $a = Pst_i Plst_i \times Pst_i P \cdot n_3$ ,如果对所有的边的  $a$  值均同号,则点在面元3内部,面元1和面元2被遮挡住;反之,点不在面元3内部,面元1和面元2不被面元3遮挡住,判断下一个壁面。

IPO方法计算流程图如图3所示,采用商业软件Gambit对几何物体生成面网格,导出mesh文件

到IPO计算程序。之后对物体网格进行几何消隐工作,对每个面元均采用相应的数组存储其可见面元编号。读入入射波长、散射角度等参数文件开始计算。当迭代达到指定的精度时,进行下一角度的计算,直至全部完成,输出RCS曲线,壁面电流云图。



(a) 消隐判断法则示意图



(b) IPO方法计算流程

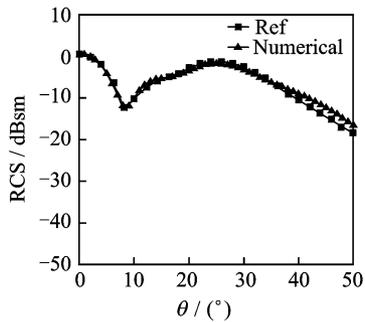
图3 消隐判断法则与程序

## 2 数值算例

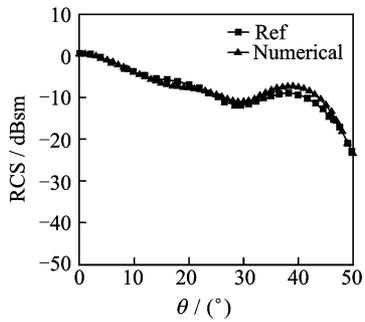
### 2.1 标准算例

采用直径12 cm,长度12 cm(4个波长)单端开口金属腔体<sup>[7]</sup>对所开发软件进行验证,本算例不需要考虑消隐问题,可验证软件仿真分析及RCS计算两模块。该模型网格数为650。计算结果如图4所示,其中“Ref”为文献[7]作者计算结果,“Numerical”为本软件计算结果。可以看出无论是 $\theta\theta$ 极化方式还是 $\varphi\varphi$ 极化方式,本程序计算结果均与参考文献吻合良好,证明本软件仿真分析算法及RCS计算正确可靠,且说明在工程实际中每平方波长取9个面元网格即可满足计算精度要求。

为验证网格对计算结果的影响,对上述模型网格加密,面网格数达到了1216个,相当于每平方波长16个三角网格,结果如图5所示。从该图可以看出,加密网格后本文计算结果与模式法(Modal)结果<sup>[7]</sup>吻合极好,验证了本程序的精确性。顺便说明,



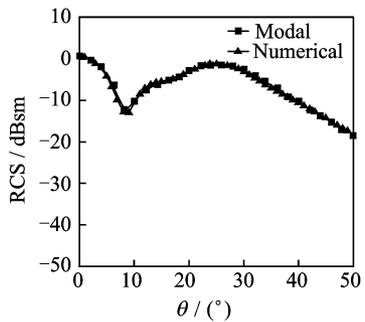
(a)  $\theta\theta$  极化



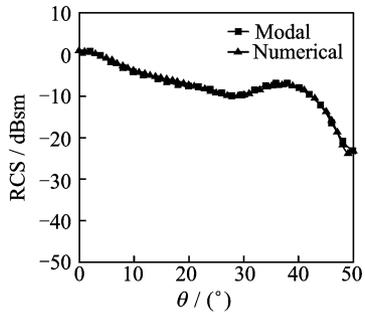
(b)  $\varphi\varphi$  极化

图 4 单端开口金属腔体 RCS 曲线

文献[7]对该模型采用每平方波长 16 个四边形网格,计算结果与模式法仍有一定差别。据图 5 似乎表明采用三角形面元模拟的电磁场比四边形面元更精确。



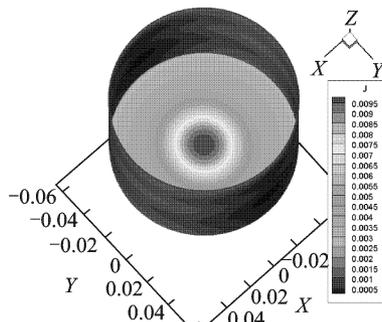
(a)  $\theta\theta$  极化



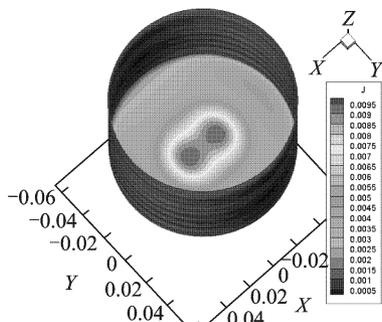
(b)  $\varphi\varphi$  极化

图 5 单端开口金属腔体(网格加密)RCS 曲线

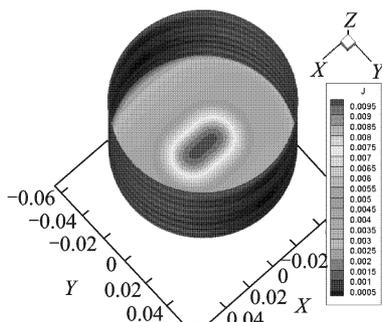
图 6 给出磁场积分方程(见式(5,6))不同迭代次数下金属腔体表面电流矢量模值分布云图。图



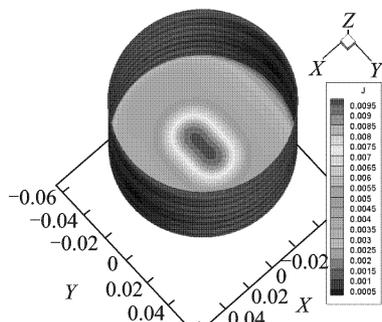
(a)  $N=0(\theta\theta$ 极化)



(b)  $N=1(\theta\theta$ 极化)



(c)  $N=3(\theta\theta$ 极化)



(d)  $N=3(\varphi\varphi$ 极化)

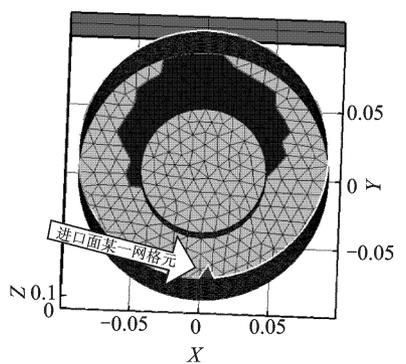
图 6 单端开口金属腔体电流场分布云图

6(a)为根据基尔霍夫公式给出的预估电流,相当于物理光学法的电流。图 6(b)为第一次迭代后壁面电流模值分布,由于壁面电流元相互作用,使电流模值最大值不再集中在腔体中心处,呈椭圆形向周围散开,同时壁面电流模值分布开始趋于平滑,褶皱抖动较小。图 6(c,d)为不同极化方式下迭代 3 次后的电

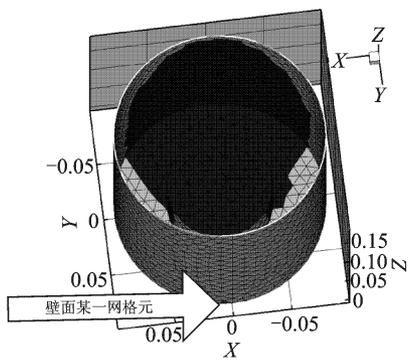
流分布图,电流分布趋于稳定,腔体底部的电流模值类“鸭蛋形”分布,电流梯度变化较小,腔体壁面电流模值要比直接照射到的腔体底部的电流模值低一个数量级。可以看出,PO方法(图6(a))与IPO方法计算得出的腔体电流分布差异较明显,且差别会随入射角增加而增大,这正是IPO方法优势所在。这是因为IPO在高频计算方法基础上融入磁场积分方程,考虑了壁面电流元之间的相互影响,具有与低频方法相当的计算精度。因此IPO兼具高频计算效率和低频计算精度的优点。此外,本软件给出的电流分布云图可以直观显示出受电磁波影响较大区域,特别有利于进气道工程人员设计改型。

## 2.2 消隐算法验证

图7为测试腔体消隐所建立的模型。该模型为单端开口的圆筒底部中央附着一小圆柱体,图7(a)表示腔体表面网格面元对进口面上某一面元可视情况,腔体灰色区域为对该进口面网格元明区区域,黑色区域为暗区区域,图7(b)为腔体之间的可视情况,同样腔体灰色区域为对该壁面网格元明区区域,黑色区域为暗区区域,从图中可以看出本程序消隐结果正确。



(a) 进口面与腔体壁面消隐



(b) 腔体面元之间消隐

图7 几何物体消隐结果

## 2.3 S弯扩压器分析

为了分析S弯扩压器对发动机界面的遮挡效果,本文采用的算例均为金属板封住扩压器出口截

面。在型心线一定的情况下设计了5种不同宽高比(进口面积一定)模型,该模型为方转圆设计。进口面参数如表1所示,进出口截面的垂直距离为36波长(1.08 m)。模型如图8所示,表面网格如图9所示,网格面元数约为7000个。

表1 进口截面长宽比 $S$ 、高 $a$ 、宽 $b$  cm

模型编号	$S$	$a$	$b$
M1	1.0	16	16
M2	1.5	19.5	13
M3	2	22.6	11.3
M4	3	27.6	9.2
M5	4	32	8

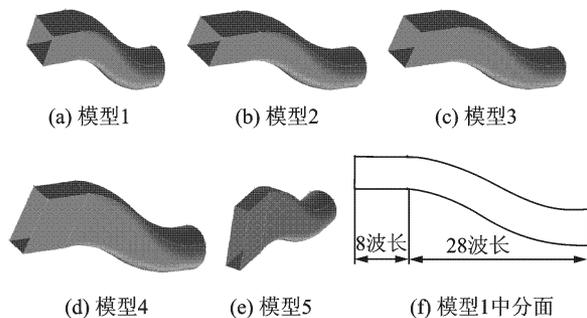


图8 模型示意图

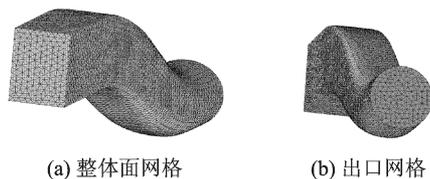


图9 模型网格示意图

为验证S弯扩压器计算结果精度,分别采用本软件 and Feko 软件多层快速多极子矩量法对模型1(编号为M1)进行数值模拟。图10为采用本软件与Feko计算M1模型的RCS结果,计算角度范围在攻角平面内 $0\sim 50^\circ$ ,这种角度范围为进气道隐身敏感角度,计算间隔为 $1^\circ$ ,电场极化方式为 $\theta\theta$ 极化。计算环境:操作系统为Win-Xp,CPU P4 3.0 GHz,内存2 GB。本文计算总耗时约为10.5 h(约为Feko耗时14.6%),其中消隐时间约占8.5 h,内存峰值约为50 MB,面元剖分密度约为9个/平方波长;Feko采用MLFMM方法加速计算,耗时约为72 h。可以看出在 $10\sim 45^\circ$ 范围内IPO计算结果与Feko结果吻合较好,能精确预测RCS二次峰谷值,这是因为在这种条件下电磁波可以直接照射在腔体底部,内部腔体的散射在整个腔体起主导作用。在 $0\sim 10^\circ$

者有明显差别,这是因为IPO方法只针对腔体内表面RCS进行评估,而Feko则同时对内外表面进行了计算,事实上当前进气道置于飞机内部时,其外表面将被机身遮挡而不会产生贡献,因此IPO方法更能体现进气道的真实RCS贡献。计算对比结果表明本软件用以进气道腔体RCS评估是可信、可行、高效快捷。

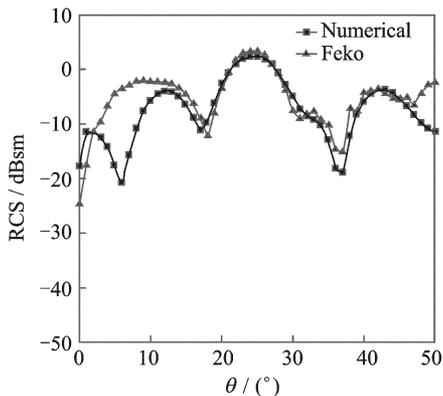


图10 S弯扩压器d1模型RCS曲线  
(攻角平面,  $\theta\theta$ 极化)

图11给出5个模型侧滑角 $0\sim 50^\circ$ 之间2种极化方式的RCS曲线图。从图11(a)中可以看出,在电磁波 $0^\circ$ 角入射时模型1的RCS值非常小,造成这一现象的原因在于其有效电磁截面相对较小,随着宽

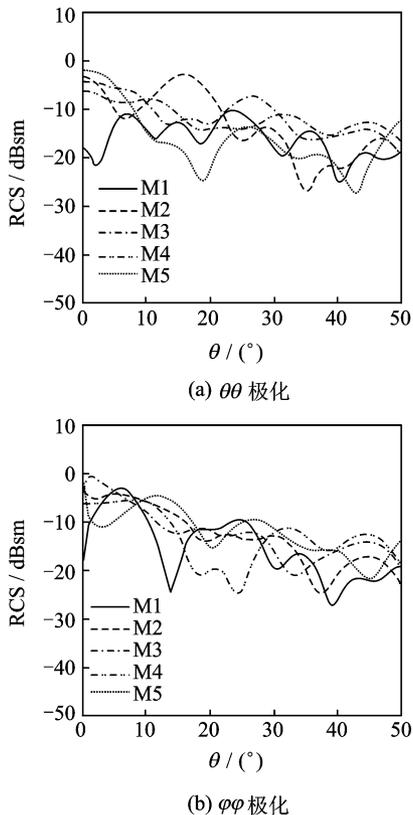


图11 RCS计算值(侧滑角平面)

高比 $s$ 增加,较多的管道出口金属面暴露在入射电磁波照射下使RCS显著上升。在 $\theta\theta$ 极化方式下,各模型均出现2次峰谷,模型5在 $20^\circ$ 附近时达到最低值 $-24$  dBsm左右。在 $\varphi\varphi$ 极化方式下(见图11(b)),该现象不明显,只有M1模型表现出较大的2次峰谷。

不同模型的RCS算术均值如表2所示,结果表明,随着宽高比增加,无论何种极化方式激励, $s \leq 2$ 模型RCS均值都随着宽高比增加而上升, $s \geq 2$ 时, $\theta\theta$ 极化下又开始呈下降趋势, $\varphi\varphi$ 极化下波动不大。模型1在2种极化方式下均具有较低的RCS均值,分别为 $-16.2$ 和 $-15.2$  dBsm。

模型编号	M1	M2	M3	M4	M5
$\theta\theta$ 极化	-16.2	-13.3	-11.5	-11.8	-16.0
$\varphi\varphi$ 极化	-15.2	-13.1	-12.3	-13.2	-12.1

图12为攻角平面内2种极化方式下的RCS曲线图,值得注意的是电场垂直极化入射下,模型3在 $8^\circ$ 左右时其RCS峰值较大,可能是该种模型在 $8^\circ$ 入射角时对该种极化方式敏感。

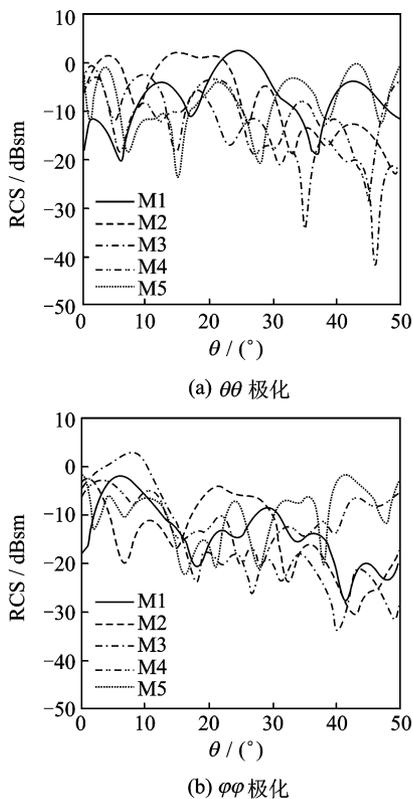


图12 RCS计算值(攻角平面)

不同模型的RCS算术均值如表3所示,结果表明,随着宽高比增加,无论何种极化方式激励, $s \leq 2$

模型 RCS 均值都随着宽高比增加而下降,但模型 1 和 2 的 RCS 均值相当;在  $s \geq 2$  后,又开始呈上升趋势,即  $S=2$  具有最小的 RCS 均值。

表 3 攻角范围内各模型 RCS 均值 dBsm

模型编号	M1	M2	M3	M4	M5
$\theta\theta$ 极化	-7.58	-7.60	-14.3	-10.9	-8.16
$\varphi\varphi$ 极化	-14.0	-14.4	-16.3	-10.6	-9.90

综合表 2,3 的结果可以看出,在侧滑角平面 RCS 均值较大的模型(M3)在攻角平面却具有最小的 RCS 均值,在侧滑角平均具有最小 RCS 均值的模型(M1)在攻角平面的 RCS 均值却最大。

### 3 结 论

基于进气道 RCS 评估的需求,研究了迭代物理光学法,得出以下结论:

(1)通过标准算例对比验证了所开发软件的正确性和准确性;并且该软件对计算资源需求相对较低、耗时较少,可用于全尺寸进气道 RCS 评估。

(2)对比分析固定型心线不同进口截面宽高比扩压器的 RCS 表明:不同扩压器在不同平面内隐身性能各有优势,因此将来有必要开展进气道隐身性能评定指标研究以便进行模型优选。

(3)所开发的软件可为进气道快速评估 RCS 提供有力的计算方法和工具,并可提供扩压器电流场分布,有利于改型设计。

#### 参考文献:

- [1] 张考,马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京:国防工业出版社,2002:20-30.  
Zhang kao, Ma dongli. Military aircraft survivability and stealth design[M]. BeiJing: National Defence Industry Press,2002:20-30.
- [2] Harrington R F. Field computation by moment methods[M]. New York: The MacMillan Company,1968.
- [3] Yee K S, Numerical solution of initial boundary val-

ue problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1966,14(3):302-307.

- [4] 石磊,郭荣伟. 蛇形进气道的电磁散射特性[J]. 航空学报,2007,28(6):1296-1301.  
Shi Lei, Guo Rongwei. Electromagnetic scattering characteristics of serpentine inlet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2007,28(6):1296-1301.
- [5] 石磊,郭荣伟. 平面埋入式进气道的电磁散射特性[J]. 航空学报,2008,29(5):1098-1104.  
Shi Lei, Guo Rongwei. Electromagnetic scattering of a submerged inlet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2008,29(5):1098-1104.
- [6] Obelleiro F, Rodriguez J L, Burkholder R J. An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1995,43(4):356-361.
- [7] Pathak P H, Burkholder R J. Modal, ray, and beam techniques for analyzing the EM scattering by open-ended waveguide cavities[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1989,37(5):635-647.
- [8] Kaye M, Murthy P K, Thiele G A. An iterative method for solving scattering problems [J]. IEEE Trans Antennas Propagat,1985,33(11):1272-1279.
- [9] Gu Changqing, Xu Jinping. Kirchhoff formula with line integral form and its applications[J]. Transactions of NUAA,1999,16(2):183-187.
- [10] 顾长青,舒永泽,徐金平. 物理光学迭代法的子域连接法[J]. 电子学报,2001,29(3):420-422.  
Gu Changqing, Shu Yongze, Xu Jinping. A subdomains splicing technique for IPO approach[J]. Acta Electronica Sinica, 2001,29(3):420-422.
- [11] 陆润民. 计算图形学教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [12] 赵维江. 复杂目标雷达截面计算方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,1999.  
Zhao Weijiang, Study on prediction techniques of radar cross section complex targets[D]. Xi'An: XiDian University,1999.