

介质涂覆位置对双 S 弯排气系统电磁散射特性影响研究

高翔 施永强 杨青真 陈立海

Electromagnetic scattering characteristics of double S-shape exhaust nozzle with different coating medium parts

Gao Xiang Shi Yong-Qiang Yang Qing-Zhen Chen Li-Hai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024103 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双三角形金属条的二维可衍生超材料性能分析

Performance analysis of double incidence derivative metamaterial based on double-triangular structure

物理学报.2015, 64(3): 034101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.34101>

热防护层覆盖弹体目标雷达散射截面的修正的等效电流近似法和图形电磁学法分析

Modified equivalent current approximation and graphical electromagnetic computing method of analyzing radar cross section of missile target scatterer covered with thermal protection layer

物理学报.2014, 63(24): 244101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244101>

一种新型宽带定向性贴片天线设计

Design of a novel wideband directivity patch antenna

物理学报.2014, 63(24): 244102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244102>

同轴交错圆盘加载波导慢波结构高频特性的研究

Dispersion characteristics of the coaxial interlaced disk-loaded waveguide slow-wave structure

物理学报.2014, 63(22): 224101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224101>

一种兼具宽带增益改善和宽带、宽角度低雷达散射截面的微带天线

A broad-band gain improvement and wide-band, wide-angle low radar cross section microstrip antenna

物理学报.2014, 63(22): 224102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224102>

介质涂覆位置对双S弯排气系统电磁散射特性影响研究*

高翔^{1)†} 施永强¹⁾ 杨青真¹⁾ 陈立海¹⁾²⁾

1) (西北工业大学动力与能源学院, 西安 710072)

2) (94638 部队, 南昌 330201)

(2014 年 4 月 18 日收到; 2014 年 7 月 17 日收到修改稿)

尾喷管作为飞行器后向强散射源之一, 可通过特殊结构设计和介质涂覆缩减其雷达散射截面 (RCS). 本文采用迭代物理光学法和阻抗边界条件的混合计算模型, 研究了 6 种涂覆方案和不涂覆时双 S 弯排气系统的电磁散射特性, 采用所提出的射线行程追踪方法提高了几何消隐计算效率, 利用前后向迭代方法加速收敛并采用 openMP 和 MPI 并行技术缩短计算时间, 获得了在 X 波段下 7 种模型的 RCS 随探测角度的变化规律. 研究表明, 介质涂覆能够有效抑制双 S 弯排气系统的 RCS; 合理的介质涂覆方案不仅具有明显的抑制效果, 同时又具有经济性好、重量轻及涂覆方便等优势; 相比全涂覆方案, 仅在喷管出口附近涂覆的方案, 可减少 73.6% 的涂覆材料, 且其 RCS 的最大增幅不超过 15.6%, 相比未涂覆方案, RCS 至少降低 18.5%. 同时所开发的计算程序可用于任意腔体电磁散射特性的计算, 可为带介质涂覆腔体试验提供技术支撑.

关键词: 迭代物理光学法, 介质涂覆, 双 S 弯排气系统, 射线行程追踪法

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.024103

1 引言

各国陆、海、空军大量装备了远程搜索和目标指示雷达, 防空导弹大部分也是由雷达引导攻击, 因此, 雷达隐身技术是飞机隐身技术研究应用的重要方向. 通过对飞机采取雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩措施, 可以减小飞机被发现及被跟踪的概率, 提高飞机生存能力. 飞机的进气道、尾喷管、座舱以及各种结构之间的缝隙和凹槽都属于腔体结构. 腔体结构是一种强散射源, 对目标的 RCS 贡献巨大, 因此降低尾喷管的 RCS 能够有效减缩飞行器后向电磁散射.

常用的 RCS 减缩技术主要分为结构设计、隐身材料涂覆以及有源与无源阻抗加载等. S 弯形的设计属于特殊结构设计, 最早是用来解决飞机进气道隐身问题. 将进气道结构设计成 S 弯, 可增加电磁

波在腔体内部的反射次数, 是减缩雷达散射截面的有效方法^[1-4]. 尤其是双 S 弯非常规进气道已经成为低可探测性飞机的典型进气道^[5], 如美国的无人攻击机 X-45 和 X-47 均采用了双 S 弯进气道设计. 对 S 弯进气道涂覆吸波材料也可降低目标的 RCS, 王龙等^[6]对 S 弯进气道进行了介质涂覆研究, 结果表明在腔体内表面涂覆吸波材料能够有效地减缩其 RCS. 双 S 弯设计还可以用于喷管部件, Brunet 等^[7]设计了一种可以用于遮挡排气系统高温部件的双 S 弯喷管, 能够降低排气系统的红外信号. 文献^[8]针对双 S 弯尾喷管的红外辐射特性进行了详细的数值研究, 结果表明, 双 S 弯尾喷管能够显著抑制尾喷管的红外辐射强度, 降低其红外信号. 国内针对双 S 弯尾喷管的雷达电磁散射特性研究鲜有报道, 并且未研究介质涂覆方案对进/排气电大腔体的影响. 吸波介质涂覆通常比较昂贵和笨重,

* 航空科学基金 (批准号: 2011ZA06001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 359575591@qq.com

如何对腔体结构进行轻巧经济的涂覆对提升尾喷管隐身设计水平具有重要的意义.

S弯腔体的电磁散射特性研究方法有高频方法、低频方法以及高低频耦合方法. 低频算法^[1,9]要求网格特征尺度不大于入射雷达波长的1/10, 因此对于进气道、尾喷管这类电大腔体, 采用低频算法所需的计算网格非常巨大, 难以满足工程计算要求. 如文献^[1]采用时域有限差分方法对蛇形进气道的研究, 其网格数量达到千万量级. 以几何光学方法 (geometrical optics, GO)^[10]为代表的射线方法, 在焦散点和焦散面处相应的场量是奇异的, 不能正确地反映电磁波在腔体内部的传播过程. 迭代物理光学法 (iterative physic optic method, IPO)^[11-13]是从目标表面磁场积分方程出发, 通过迭代求解出表面电流的分布, 进而求解目标电磁散射的方法. 该方法能有效地模拟目标表面之间的多次反射作用, 适合于计算角反射器、腔体等物体的电磁散射. 国内外学者针对IPO方法的研究工作, 主要集中在迭代算法的改进、电大腔体计算^[14-16]以及将其应用于进气道的电磁散射特性的研究^[1,6,17], 针对双S弯喷管腔体电磁散射的研究较少.

本文在已有的前后向迭代物理光学法 (FBIPO) 的基础上, 采用射线行程追踪方法 (ray tracing method, RTM) 大大提高了几何消隐的判断效率, 通过引入阻抗边界条件使其能计算带介质涂覆的电大腔体的电磁散射特性. 研究了不同涂覆方案对双S弯尾喷管 RCS 的影响, 可为相应的介质涂覆研究及实验研究提供理论指导.

2 计算方法

IPO方法是Basteiro等^[11]于1995年提出的, 它是在物理光学近似的基础上, 考虑多次反射, 通过迭代求解磁场积分方程来求得任意形状腔体的一种迭代方法, 它用光学电流与修正电流叠加来逼近目标表面的真实电流, 能解决纵向深度比较大的腔体散射问题. 为提高迭代效率, 在迭代过程中采用前后向迭代物理光学法和欠松弛因子技术, 以加速迭代收敛. 本文计算中松弛因子为0.65.

对于介质涂覆的电大腔体, 由于受到内存与计算速度的限制, 难以应用低频数值方法求解. Obelleiro等^[18]在IPO方法的基础上引入阻抗边界条件使得IPO方法能够处理介质涂覆的腔体问题. 等效阻抗边界条件用一个等效阻抗或者一个偏

微分方程作用于散射体与周围空间界面上, 避免了对涂覆层内复杂的电磁波的分析, 从而极大地简化了计算. 等效阻抗边界条件结合迭代物理光学法可以在保持合理精度下有效地处理涂覆介质腔体的计算问题.

3 射线行程追踪方法

在利用IPO计算面元感应电流密度时, 需考虑目标各面元能否被入射波照明及目标各面元之间能否相互照明, 因此在进行腔体内壁面真实电流计算前必须做面元间遮挡关系判别.

面元是否被遮挡可近似认为该面元中心是否可以被照射面元看到. 基于这种近似, 本文提出了一种射线追踪法用来判断面元间的遮挡关系. 此方法在体网格构建较好时, 运行效率可比常用算法提高一个数量级以上. 算法具体过程如下.

1) 应用商业网格软件生成满足计算精度要求的腔体壁面网格, 然后在腔体空间生成体网格. 导出的网格文件中保存着面网格信息和体网格区域连通性信息, 其中面网格信息即IPO计算所需面元, 体网格信息用来判断面元间的遮挡关系.

2) 对任意两面元A, B, 首先判断其法向相互指向, 即两面元若相互照射, 则必须满足:

$$\mathbf{r}_{21} \times \mathbf{n}_1 > 0 \quad \text{且} \quad \mathbf{r}_{21} \times \mathbf{n}_2 < 0,$$

其中 $\mathbf{r}_{21}$ 表示由面元B到A的几何中心线矢量; $\mathbf{n}_1$, $\mathbf{n}_2$ 分别为面元A和B的法向单位矢量. 如果不满足条件(2), 则说明两面元间不存在照射关系; 如果满足条件(2), 则直接进行下一步判断.

3) 从A, B两面元中任意面中发射一条射线, 依次寻找射线传输方向上穿过的流体计算单元, 如果在到达接收微元面之间穿越的所有流体计算单元边界均为透明边界, 说明两面元之间有照射关系, 如图1中射线1. 如果在射线传输途径之间射线

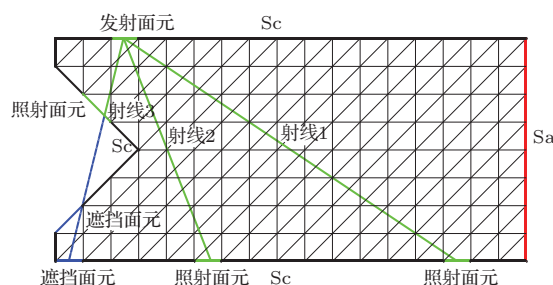


图1 (网刊彩色) 射线追踪示意

穿越了遮挡性质的单元边界, 说明发射与接收微元面之间没有照射关系, 如图1中射线3所示, 其中蓝色射线为被遮挡后的假象射线.

射线追踪法使用了网格文件中流场体单元域的连通信息. 所谓区域连通性是指任意流体单元都存储着边界及与之相邻的体单元编号. 射线行程追踪方法能够提高计算效率的原因是: 在计算遮挡关系时, 单个射线方向只需计算在射线方向上的面元而不需要计算所有固体面元, 减少了计算规模; 对于单个探测角度, 用于照射关系判断的射线总数与 S_a 面上的面元数量有关, 而与腔体壁面 S_c 无关, 因此可进一步提高照射关系的判断效率; 其次, 由于IPO与腔体内部体网格无关, 故为了缩短计算时间, 可在电磁边界网格内部生成较粗的内部连通体网格, 加速射线行程追踪. 此外, 在实际计算中RTM

方法可方便地采用并行技术进行加速.

4 研究对象

本文以曲率控制方法生成了宽高比为4的双S弯喷管壁面, 并在进口处加装了内外涵通道(混合器)、中心锥, 故排气系统内部所需介质涂覆的部件包括混合器内外表面和中心锥表面(如图2左图所示). 为了分析双S弯排气系统内壁不同位置介质涂覆对喷管电磁散射特性的影响, 根据其内部结构、雷达探测角范围及壁面曲率的变化规律, 将喷管壁面划分为6个介质涂覆区域(如图2右图所示), 通过初步计算选取了7个典型研究模型进行深入分析, 涂覆方案如表1所示, 其中Model1为全介质涂覆模型方案, Model2为无介质涂覆模型方案.

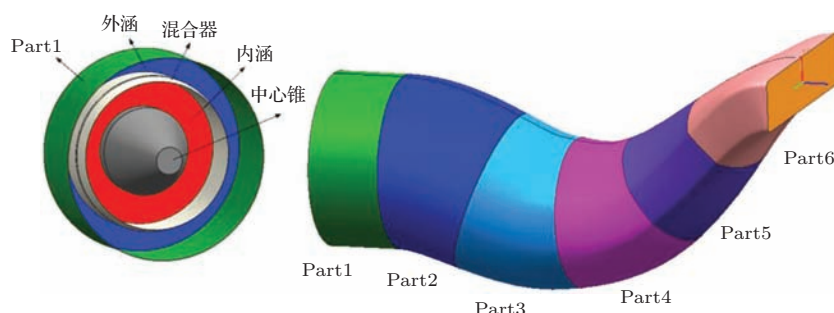


图2 (网刊彩色) 介质涂覆区域示意

表1 不同涂覆位置计算模型

	Model1	Model2	Model3	Model4	Model5	Model6	Model7
Part 1	✓	—	—	✓	✓	—	—
Part 2	✓	—	—	✓	✓	—	—
Part 3	✓	—	—	✓	✓	—	✓
Part 4	✓	—	—	✓	✓	—	✓
Part 5	✓	—	—	✓	✓	✓	✓
Part 6	✓	—	—	✓	✓	✓	✓
中心锥	✓	—	✓	✓	—	—	—
混合器	✓	—	—	—	—	—	—
涂覆区域面积比例	1	0	0.046	0.882	0.836	0.268	0.554

5 数值验证及算例

5.1 介质涂覆算例

选取直径 $D = 12$ cm, 长 $L = 12$ cm, 内壁面涂有吸波介质的标准圆柱腔体, 涂覆材料厚度6 mm, 相对磁导率 $\mu_r = 1.0$, 相对介电常数 $\epsilon_r = 6.11 - 0.78i$, 入射波波长 $\lambda = 3$ cm, 网格剖分密度及网格数与金属腔体相同. 图3为RCS计算结果, 其中“介质涂覆”为本文计算介质涂覆腔

体的结果, “文献对比”为文献[19]的计算结果, “金属表面”为本文计算无涂覆金属腔体的结果. 从图中可以看出, 无论是 $\theta\theta$ 极化还是 $\varphi\varphi$ 极化, 本文的计算结果均与文献的计算结果符合良好, 从而验证了本程序采用阻抗边界条件计算介质涂覆腔体的正确性. 通过图3中的曲线对比表明, 无论是哪种极化方式下, 在该金属腔体内壁涂覆吸波介质, 均可有效地降低其RCS的值, 起到很好的减缩作用.

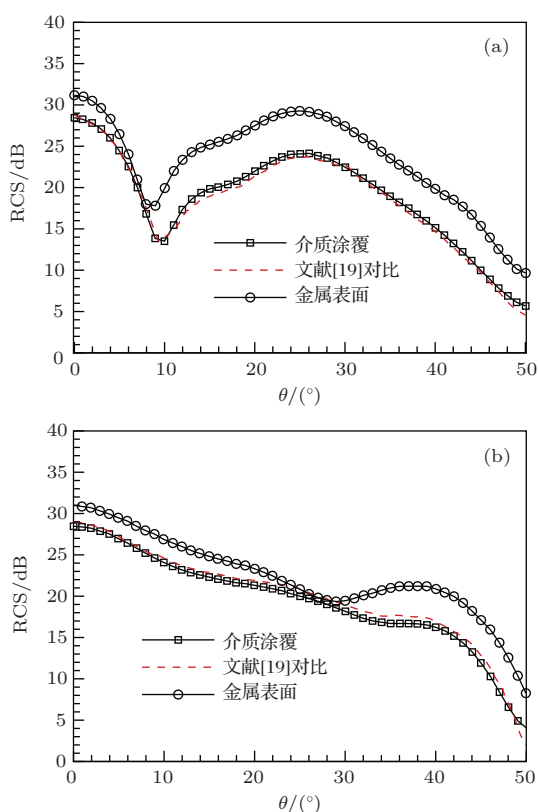


图3 介质涂覆腔体 RCS 计算结果 (a) $\theta\theta$ 极化; (b) $\varphi\varphi$ 极化

5.2 几何消隐关系判断算例

上述算例验证了本文 IPO 程序核心算法的正确性, 但其计算模型较为简单, 面元之间不存在多重遮挡关系. 为了验证本文面元间遮挡关系判断(几何消隐)方法的正确性, 计算了一个底端带突起结构的圆柱形腔体电磁散射特性. 如图 4 所示, 腔体长度 $L = 18$ cm, 直径 $D = 18$ cm, 圆柱形突起结构 $L_{in} = 4.5$ cm, 直径 $D_{in} = 9$ cm. 计算条件: 入射波波长 $\lambda = 3$ cm, 网格剖分密度为每平方波长 16 个三角面元, 网格总数为 3416.

图 5 给出了本算例的 RCS 计算结果, 计算角度为 $\theta = 0^\circ \sim 50^\circ$, 角度间隔为 1° , 其中“本文结果”为本文迭代 10 次的计算结果. 从图中可以看出, 在 $\theta\theta$ 极化方式下, 本文计算结果与文献结果符合较好: 在小角度范围内, 本文与文献 [20] 结果基本一致, 在大角度范围内, 本文结果与文献 [21] 结果符合较好. 产生这样结果的主要原因可能是网格剖分密度与迭代次数的不同造成的(文献中的网格剖分密度为每平方波长 9 个三角面元). 在 $\varphi\varphi$ 极化方式下, 大角度范围内, 本文的计算结果与文献结果有较大差异, 这很可能是迭代收敛精度的不同所致. 值得说明的是, 本文结果与用腔体模式法所计算的

结果更接近, 间接地验证了本文程序中面元几何消隐模块的正确性.

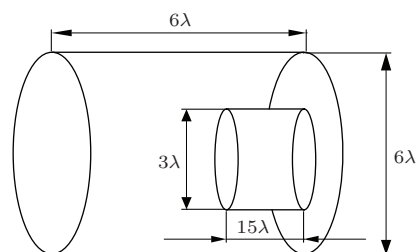


图4 带圆柱形突起腔体结构

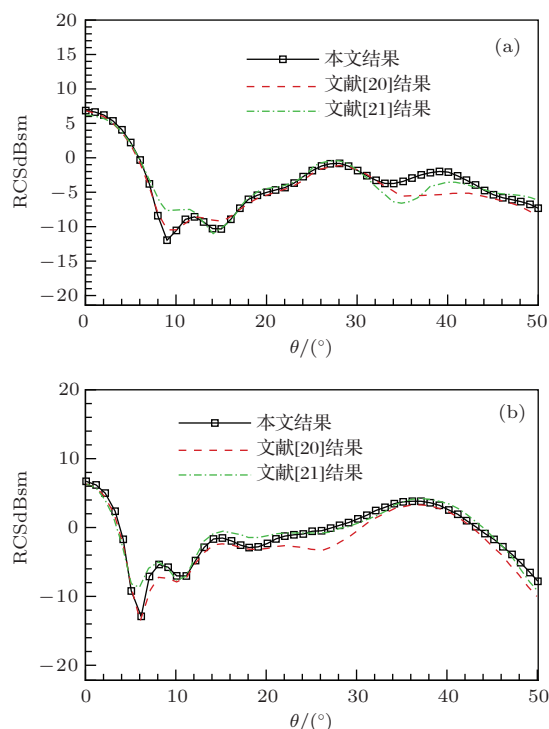


图5 (网刊彩色) 带圆柱形突起腔体 RCS 计算结果 (a) $\theta\theta$ 极化; (b) $\varphi\varphi$ 极化

表 2 给出了本算例几何消隐耗时对比结果. 为了对比鲜明, 对模型壁面网格进行了加密, 网格总数为 14110, 相当于每平方波长 81 个网格. 由于 IPO 方法与腔体内部体网格无关, 故为了缩短计算时间, 可以在电磁边界网格内部生成较粗的内部连通体网格, 加速射线行程追踪. 表中粗网格是在腔体内部生成尽可能粗的连通体网格, 如图 6(a) 所示; 原始网格是指以边界网格为基础在腔体内部生成尺度与边界网格相近的连通体网格, 如图 6(b) 所示. 需要说明的是, 两种体网格的电磁边界网格相同, 因此无论采用粗网格还是原始网格, 其计算结果具有相同的计算精度.

表 2 不同方法几何消隐时间对比

体网格类型	RTM 方法			传统方法	
	粗网格	粗网格	原始网格	原始网格	原始网格
线程数	1	4	4	1	计算时间/4
计算耗时/s	727	188	479	19382	4832
耗时比	3.87	1	2.5479	102.8085	25.7021

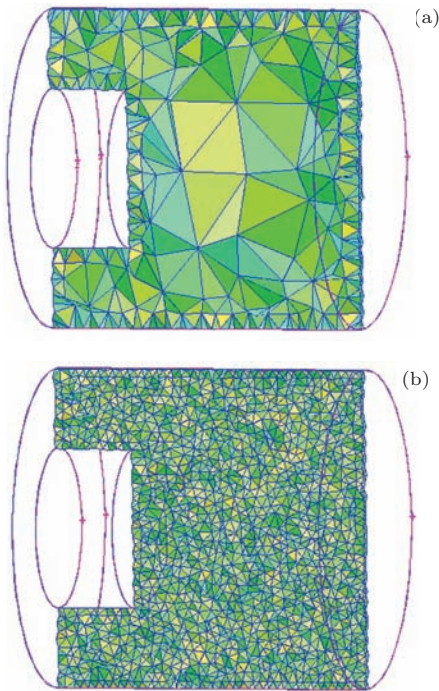


图 6 (网刊彩色) 不同网格剖面图 (a) 粗网格剖面; (b) 原始网格剖面

表 2 中 RTM 方法在体网格为粗网格的计算情况下, 采用 openMP 并行方法的加速比为 3.87, 接近线性加速比. 在 4 线程计算条件下, 粗网格结果与原始网格对比, 原始网格耗时为粗网格的 2.5 倍, 说明采用粗网格能够在不损失计算精度的情况下大幅提高计算效率. 而采用传统方法进行几何消隐计算, 即使是按线性加速比计算, 4 线程耗时至少是原始网格 RTM 方法耗时的 10 倍, 是 RTM 粗网格耗时的 25 倍. 一般情况下, 几何消隐耗时至少占整个计算过程耗时的一半以上, 而采用 RTM 方法可以大幅度降低几何消隐时间, 显著减少整个计算过程的耗时. 以本算例为例, IPO 单次迭代时间大约为 36 s, 在粗网格 4 线程计算条件下 RTM 几何消隐计算耗时为 188 s, 仅为 5 到 6 次 IPO 单次迭代耗时. 整个 IPO 计算过程按 4 线程并行计算, 计算角度为 $\theta = 0^\circ\text{--}50^\circ$, 角度间隔为 1° , 单个探测角度上迭代 10 次, 整个计算过程耗时约为 9188 s, 几何消

隐耗时约占整个计算机时的 2.04%.

6 分析讨论

图 7 是雷达波针对喷管腔体的探测角度示意图. 根据文献 [22] 中的 RCS 减缩的重点姿态角选取探测角度为: 俯仰探测角为 $-40^\circ\text{--}40^\circ$, 方位探测角为 $-40^\circ\text{--}40^\circ$. 入射波长为 30 mm, 每个平方波长上含有 12 个三角面元, 计算网格数量约为 12 万.

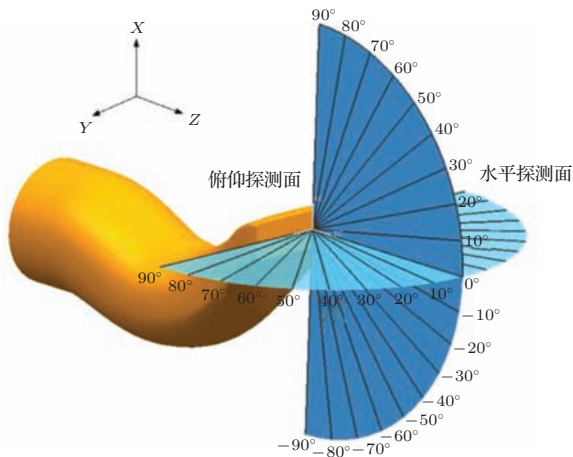


图 7 (网刊彩色) 目标探测角度定义示意

由图 8 可见, 在 $-40^\circ\text{--}0^\circ$ 俯仰探测角范围内, Model2, Model3 的 RCS 值明显高于其他模型, 说明对双 S 弯排气系统内壁区域进行介质涂覆的方案可有效降低 RCS, 这主要是因为雷达在 $-40^\circ\text{--}0^\circ$ 俯仰探测角范围内照射时, 雷达波产生的初始感应电流分布主要集中在 S 弯排气系统第二个拐弯处的上壁面, 这些雷达波被吸波涂覆材料吸收导致反射的雷达波强度降低, 并在 S 弯排气系统内部进行多次反射. 由于 S 弯排气系统内壁面涂有吸波介质, 雷达波在反射时有能量损耗, 因此对壁面进行介质涂覆能够降低目标的 RCS. 在 $0^\circ\text{--}40^\circ$ 探测角范围内, 介质涂覆对 S 弯排气系统的雷达波

电磁散射特性有一定的影响,这主要是因为雷达在 $0^\circ\text{--}20^\circ$ 探测角范围内照射时,雷达波直接照射到S弯排气系统内部下侧壁面及中心锥附近,此时有部分镜面回波(这与腔体终端的金属壁面假设有关),其余部分在排气系统内部经过多次反射后被雷达接收,反射波既包括镜面回波也包括多次反射波,而雷达回波受S弯排气系统内部复杂结构的影响,其反射路径较为复杂,因此与 $-40^\circ\text{--}0^\circ$ 探测角范围相比,在此探测范围内吸波介质涂覆对S弯排气系统的RCS抑制效果不明显,但在 $27^\circ\text{--}40^\circ$ 范围内与无介质涂覆Model2相比仍有较好的抑制效果,最大可降低39.74%.

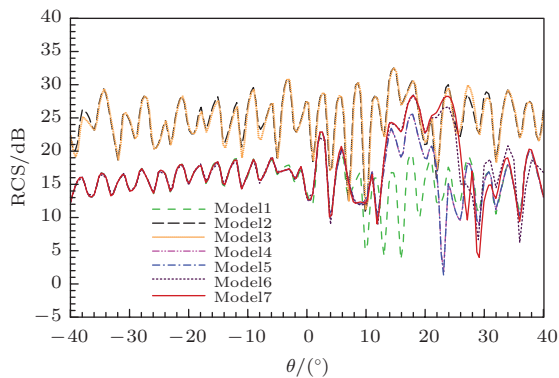


图8 (网刊彩色) 俯仰探测平面内垂直极化方式下双S弯排气系统不同介质涂覆区域的RCS分布曲线

图9是水平探测平面上的RCS随方位角的分布曲线.图中表明所选取的7种模型的RCS呈现出两类不同的分布趋势:一种类是以金属介质表面的Model2和仅对中心锥进行介质涂覆处理后的Model3为代表;另一类是对双S弯排气系统进行腔体表面介质涂覆处理的模型.在重点方位角范围内,第一类模型的RCS均明显高于第二类模型.结合图8和图9可知,仅对中心锥进行涂覆不能够抑制双S弯喷管的雷达波探测信号,Model2与Model3的RCS随探测角度变化分布曲线基本一致.这主要是因为双S弯喷管的特殊构型对中心锥有遮挡作用,照射到中心锥表面的雷达波不能形成直接反射出腔体的散射回波,而通常情况下这种镜面散射回波是强的探测信号.其他方案的RCS随

方位角变化分布基本处于相同水平,且水平探测平面的RCS分布相对俯仰探测平面的值较小,这主要是由于探测平面为水平面,受喷管出口宽高比的影响作用,雷达波直接照射喷管出口壁面附近而不能够直接照射到排气系统内部,而且随着探测角度偏离 0° 探测角,雷达波直接照射面积逐渐减小,RCS有降低的趋势.对喷管出口段附近进行涂覆吸波材料处理后,直接照射的雷达波部分被吸波材料吸收,由介质表面反射的雷达波强度降低,因此出口附近涂覆吸波材料模型的RCS明显低于未涂覆的.

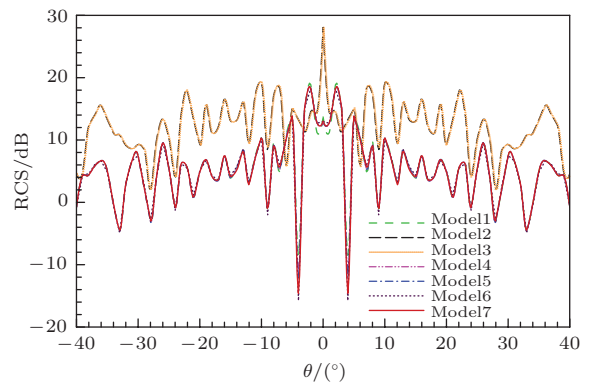


图9 (网刊彩色) 水平探测平面内垂直极化方式下双S弯排气系统不同介质涂覆区域的RCS分布曲线

表3和表4分别为俯仰、水平探测平面下垂直极化方式的RCS不同角度范围内的平均值,无量纲方法为 $\overline{\text{RCS}}_i/\overline{\text{RCS}}_{\max}$, $\overline{\text{RCS}}_i$ 为模型RCS均值,单位为dB, $\overline{\text{RCS}}_{\max}$ 为均值中的最大值,单位为dB.表3中Model2和Model3的RCS均值相差不大,其他模型的RCS均值均低于这两种模型,这表明对中心锥表面进行介质涂覆基本不改变RCS的均值,喷管壁面涂抹吸波材料能够显著降低目标的RCS.表4中其他模型的RCS无量纲均值比Model2, Model3低,且数值基本相似.上述现象反映出对喷管壁面进行介质涂覆比仅涂抹中心锥表面的方案减缩效果明显,水平探测平面下受喷管出口附近壁面的介质涂覆影响,喷管壁面介质涂覆的模型RCS均值相差不大.

表3 俯仰探测平面不同角度范围内无量纲RCS平均值

	Model1	Model2	Model3	Model4	Model5	Model6	Model7
$-40^\circ\text{--}40^\circ$	0.615	0.992	0.989	0.657	0.658	0.711	0.721
$0^\circ\text{--}40^\circ$	0.616	0.970	0.962	0.615	0.615	0.615	0.616
$-30^\circ\text{--}30^\circ$	0.623	1.000	0.998	0.674	0.675	0.717	0.721

表4 水平探测平面不同角度范围内无量纲 RCS 平均值

	Model1	Model2	Model3	Model4	Model5	Model6	Model7
$-40^\circ\sim 40^\circ$	0.520	0.951	0.953	0.513	0.513	0.517	0.515
$-30^\circ\sim 30^\circ$	0.570	0.999	1.000	0.562	0.562	0.566	0.564

图10是俯仰探测平面 18° 探测角垂直极化方式下的壁面感应电流密度云图. 由图可见, Model2和Model3在喷管出口附近的表面感应电流密度高于其他模型, 这说明在喷管出口附近壁面上涂抹吸波材料能够有效降低壁面的感应电流密度. 此外, 其他模型与Model1对比, 在混合室内壁面有较大的感应电流密度分布区, 这可能会在某些探测角度下产生镜面雷达回波, 从而影响腔体的RCS, 使得内涵壁面未涂覆吸波材料的模型在 $10^\circ\sim 20^\circ$ 探测角度范围内RCS升高. 图11是水平探测平面 10° 探测角垂直极化方式下的壁面感应电流密度云图. 由Model2的感应电流密度分布可见, 未涂覆吸波介质材料的喷管电流感应密度明显高于其他模型, 且电流感应密度较大的区域在第二弯附近.

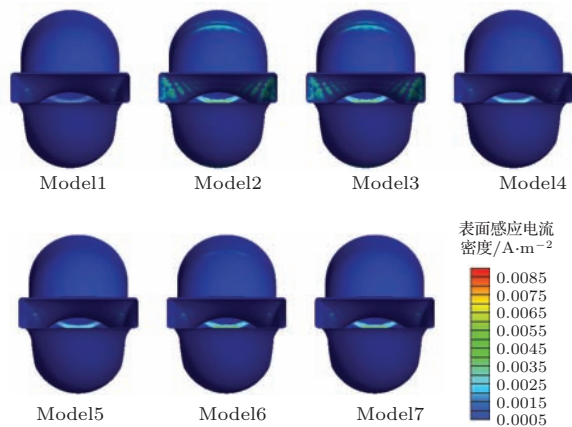
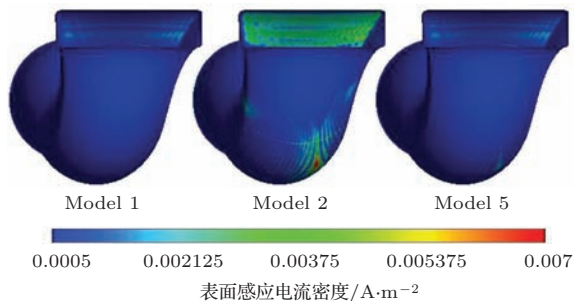
图10 (网刊彩色) 垂直极化方式下俯仰探测平面感应电流分布云图(18° 探测角)图11 (网刊彩色) 垂直极化方式下水平探测平面感应电流分布云图(10° 探测角)

图12和图13分别为俯仰、水平探测平面下水平极化方式的RCS随探测角度变化曲线. 由图可

得水平极化方式下的RCS的角向分布与垂直极化方式下类似, 相比于对中心锥进行介质涂覆, 对喷管壁面进行介质涂覆处理能够更有效地降低喷管的RCS.

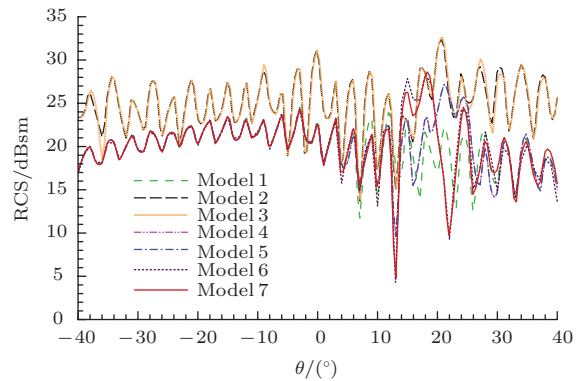


图12 (网刊彩色) 俯仰探测平面内水平极化方式下双S弯排气系统不同介质涂覆的RCS分布曲线

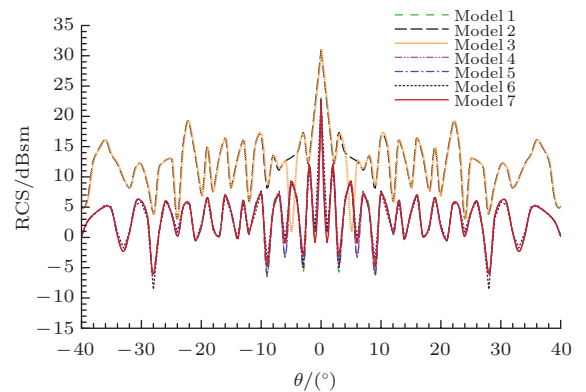


图13 (网刊彩色) 水平探测平面内水平极化方式下双S弯排气系统不同介质涂覆的RCS分布曲线

仰视探测角度通常为远程轰炸机的RCS减缩重点姿态角, 图8和图12中Model2和Model3的RCS值, 在 $-40^\circ\sim 0^\circ$ 范围内基本均高于其他模型, 表明合理的涂覆方案能够降低RCS. 表5中反映了在 $-40^\circ\sim 0^\circ$ 范围内俯仰方向的RCS平均值, Model2和Model3的RCS均值均高于其他模型, 而Model1, Model4—Model7对RCS的减缩效果相当, 说明合理的介质涂覆位置能够降低RCS均值. 由表3与表5可以看出, 在 $\pm 40^\circ$ 和 $\pm 30^\circ$ 俯仰角范围内, 无论是垂直极化还是水平极化方式,

相比于全涂覆方案 Model1, Model6 的 RCS 均值最大仅增加了 15.6%, 但其涂覆介质消耗量比 Model1 降低了 73.6%. 因此在此角度范围内 Model6 是综合考虑经济、重量、维护成本等因素后较好的涂覆方案.

表 4 和表 6 表明, 在水平探测方向上不同极化方式下, 全部涂覆模型与部分涂覆模型 Model4—Model7 的减缩效果基本处于相同水平, RCS 减缩至少可达 43.3% 以上, 而 Model6 采用最少的涂覆材料, 达到了相同的减缩效果.

图 14 为俯仰角 18° 时水平极化方式下的感应电流密度分布云图. Model2 与 Model3 在探测平面上的电流感应密度明显高于其他模型; Model1 在混合器内壁面的电流感应密度低于其他模型. 对比 Model4—Model7 发现, 随着涂覆面积的增加, 喷管壁面的感应电流密度逐渐降低, Model7 与 Model6

相比, part 1 上壁面较大的电流感应密度区消失. 这主要是因为雷达波在喷管内多次经过涂抹吸波材料的壁面反射, 强度逐渐降低.

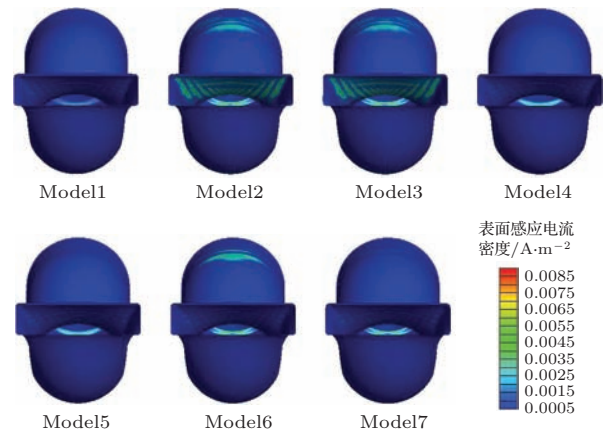


图 14 (网刊彩色) 俯仰角 18° 时水平极化方式下的感应电流密度分布云图

表 5 俯仰探测平面不同角度范围内无量纲 RCS 平均值

	Model1	Model2	Model3	Model4	Model5	Model6	Model7
$-40^\circ-40^\circ$	0.782	0.994	0.995	0.805	0.805	0.817	0.810
$0^\circ-40^\circ$	0.810	0.976	0.978	0.809	0.809	0.809	0.810
$-30^\circ-30^\circ$	0.797	0.998	1.000	0.825	0.825	0.840	0.830

表 6 水平探测平面不同角度范围内无量纲 RCS 平均值

	Model1	Model2	Model3	Model4	Model5	Model6	Model7
$-40^\circ-40^\circ$	0.486	0.951	0.952	0.471	0.472	0.473	0.478
$-30^\circ-30^\circ$	0.536	0.999	1.000	0.521	0.521	0.522	0.527

7 结 论

本文主要研究了适用于计算介质涂覆和金属表面的双 S 弯排气系统 RCS 的迭代物理光学法, 并系统地分析了介质涂覆对排气系统后向电磁散射特性的影响规律, 得到如下结论.

1) 对 IPO 方法引入阻抗边界条件可以解决介质涂覆/局部介质涂覆的 S 弯电大腔体的电磁散射特性问题; 利用 openMP 和 MPI 并行方法可以有效缩短 FBIPO 的计算机时, 采用射线行程追踪方法大大提高了几何消隐判断效率; 通过与文献算例对比验证了本文所采用方法的正确性. 采用并行解决方案的 FBIPO 方法可以为电大腔体的隐身设计提供快速预估.

2) 对双 S 弯排气系统进行了不同介质涂覆方案的数值仿真. 研究表明, 无论水平极化方式还是垂直极化方式下, 对中心锥表面进行介质涂覆不能明显改善其电磁散射特性; 对排气系统内壁面进行介质涂覆能有效降低其 RCS; 受双 S 弯排气系统结构的影响, 内壁面介质涂覆方案在雷达负探测角范围内对其 RCS 抑制效果明显.

3) 相比于全涂覆方案, 本文 Model6 的介质涂覆方案涂覆材料消耗减少 73.6%, 而在俯仰 $\pm 40^\circ$ 范围内 RCS 均值, 垂直极化方式比全涂覆方案高 15.6%, 水平极化方式仅高 4.5%, 相比未涂覆方案分别降低 28.3% 和 18.5%, 在俯仰角 $-40^\circ-0^\circ$ 范围内相比全涂覆方案两者 RCS 的平均值基本一致, 而在水平探测方向上相比全涂覆方案的 RCS 均值最大不高于 2.7%, 相比未涂覆方案降低至少 43.3%.

感谢西北工业大学材料学院罗发教授提供的耐高温吸波材料及相应物性参数用于仿真及试验研究,感谢航空基金提供的研究经费的支持,感谢西北工业大学无人机特种技术重点实验室为后续的实验测试提供技术支持。

参考文献

- [1] Shi L, Guo R W 2007 *Acta Aeron. Astron. Sin.* **28** 1296 (in Chinese) [石磊, 郭荣伟 2007 航空学报 **28** 1296]
- [2] Guo W Y, Zhu Y Z, Li H T 1999 *J. Harbin Institute Technol.* **31** 123 (in Chinese) [郭文彦, 朱颜镇, 李海涛 1999 哈尔滨工业大学学报 **31** 123]
- [3] Wan S S, Luo Q J, Guo R W 2006 *J. Aerosp. Power* **21** 1033 (in Chinese) [万顺生, 罗屹洁, 郭荣伟 2006 航空动力学报 **21** 1033]
- [4] Ji J Z, Wu Z, Liu Z H 2009 *J. Xidian Univ.* **36** 746 (in Chinese) [姬金祖, 武哲, 刘战合 2009 西安电子科技大学学报 **36** 746]
- [5] Gridley M C, Walker S H 1996 *Am. Soc. Mech. Eng.* p8
- [6] Wang L, Zhong Y C, Zhang K Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234101 (in Chinese) [王龙, 钟易成, 张堃元 2012 物理学报 **61** 234101]
- [7] Brunet E, Seine N S, Daris T 2010 *US Patent* 007784284B2
- [8] Liu C C, Ji H H, Huang W 2013 *J. Aerosp. Power* **28** 1482 (in Chinese) [刘常春, 吉洪湖, 黄伟 2013 航空动力学报 **28** 1482]
- [9] Wang A Q, Guo L X, Chai C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 050202
- [10] He G Y, Lu Y C 2006 *Calculation and Measurement of Electromagnetic Scattering* (Beijing: BeiHang University Press) p196 (in Chinese) [何国瑜, 卢有才 2006 电磁散射的计算和测量 (北京: 北京航空航天大学出版社) 第196页]
- [11] Basterio F, Rodriguez J L, Burkholder R J 1995 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **43** 356
- [12] Nie Z P, Fang D G 2009 *The Model of Electromagnetic Scattering of Objective and Environment* (Basic Volume) (Beijing: National Defense Industry Press) p180 (in Chinese) [聂在平, 方大纲 2009 目标与环境电磁散射特性建模——理论, 方法与实现 (基础篇) (北京: 国防工业出版社) 第180页]
- [13] Burkholder R J, Lundin T 2005 *IEEE Trans. Propag.* **53** 793
- [14] Hasaba R, Ito K, Ando M 2011 *IEEE International Conference on Microwave Technology & Computational Electromagnetics (ICMTCE)* Beijing May 22–25, 2011 p380
- [15] Ding H, Li B Y, Gao P C 2012 *10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (IS-APE)* Xi'an Oct. 22–26, 2012 p1012
- [16] Chen L H 2013 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [陈立海 2013 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [17] Li Y F, Yang Q Z, Gao X 2013 *J. Propul. Technol.* **34** 577 (in Chinese) [李岳峰, 杨青真, 高翔 2013 推进技术 **34** 577]
- [18] Obelleiro F, Araújo M G, Rodríguez J L 2001 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **28** 21
- [19] He X X, Xu J P, Gu C Q 2005 *J. Electron. Inform. Technol.* **27** 136 (in Chinese) [何小祥, 徐金平, 顾长青 2005 电子与信息学报 **27** 136]
- [20] Yan Y B, Ge D B, Nie X C 2001 *J. Microw.* **17** 35 (in Chinese) [闫玉波, 葛德彪, 聂小春 2001 微波学报 **17** 35]
- [21] Xu X Y 2007 *M. S. Dissertation* (Xi'an: XiDian University) (in Chinese) [许小艳 2007 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [22] Zhang K, Ma D L 2002 *Military Aircraft Survivability and Stealth Design* (Beijing: National Defense Industry Press) pp195–202 (in Chinese) [张考, 马东立 2002 军用飞机生存力与隐身设计 (北京: 国防工业出版社) 第195–202页]

Electromagnetic scattering characteristics of double S-shape exhaust nozzle with different coating medium parts^{*}

Gao Xiang^{1)†} Shi Yong-Qiang¹⁾ Yang Qing-Zhen¹⁾ Chen Li-Hai¹⁾²⁾

1) (School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

2) (No.94638 PLA, Nanchang 330201, China)

(Received 18 April 2014; revised manuscript received 17 July 2014)

Abstract

As one of the strong electromagnetic scattering source of the aircraft, the radar cross section (RCS) of the nozzle can be reduced by the special geometry and coating microwave absorbing material at the backward direction of the aircraft. In order to simulate the radar scattering characteristics of six coating models and one metal surface model of double S-shape nozzle, the mode combining impedance boundary condition with iterative physical optics (IPO) method is built. Forward and back-forward IPO method and open MP, MPI parallel computing technology are added to accelerate the convergence and reduce computational time. Besides, the ray tracing method is also adopted to improve the efficiency of geometric blanking judgment. The RCS variation regulations of 7 models under X waveband are obtained. The results indicate that coating medium can effectively diminish the RCS of double S-shape exhaust system. Proper coating method can not only reduce the RCS of exhaust system significantly, but also be economical, easy to coat and light-weight. Compared with all parts coating medium model, the model which is only coated at nozzle outlet can reduce microwave absorbing material cost by 73.6% and ensure that the maximal increment of RCS is less than 15.6%. Comparing with the metal model case, The RCS will decrease by at least 18.5%. The improved IPO method can be applied to the RCS evaluation of cavity and the study of coating absorbing material method, and provide technical support for the coating medium model experiment.

Keywords: iterative physical optics, medium coating, double S-shaped exhaust system, ray tracing method

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.024103

^{*} Project supported by the Aviation Science Foundation of China (Grant No. 2011ZA06001).

[†] Corresponding author. E-mail: 359575591@qq.com