

复杂飞行器目标强散射区求解及 RCS 减缩

刘忠铁^{1,2}, 马东立¹, 楚亮¹

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 空军装备研究院总体所, 北京 100076)

摘要: 对目标表面强散射区涂敷雷达吸波材料(radar absorbing material, RAM)是雷达散射截面(radar cross section, RCS)减缩的有效方法。基于射线追踪法(shooting and bouncing rays, SBR)提出一种确定复杂目标强散射区的方法:根据射线管出射方向与雷达接收方向的夹角判断强散射区。分析了复杂目标强散射区涂敷 RAM 的 RCS 减缩特性,并研究了判断夹角取不同值时强散射区大小和涂覆 RAM 后的减缩效果。计算结果显示,对强散射区涂覆 RAM 可以在重量增加不大的情况下有效降低目标 RCS 值。

关键词: 强散射区; 射线追踪法; 涂覆; RCS 减缩

中图分类号: V 218

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.03

Complex aircraft target strong scattering region solving and RCS reduction

LIU Zhong-tie^{1,2}, MA Dong-li¹, CHU Liang¹

(1. School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. General Institute, Air Force Equipment Academy, Beijing 100076, China)

Abstract: Coating the strong scattering region of target surface with radar absorbing material (RAM) is one of the effective methods for radar cross section (RCS) reduction. A definition of strong scattering regions based on shooting and bouncing rays (SBR) is given: judging a strong scattering region based on the included angle between outgoing direction of rays and receiving direction of radar. The RCS reduction characteristic of complex target's strong scattering region coating RAM is analyzed, and the size of the strong scattering region and the RCS reduction effects with different judging included angles are studied. Calculation results show that the strong scattering region coating RAM can reduce RCS with a limited increase in weight.

Keywords: strong scattering region; shooting and bouncing rays; coating; RCS reduction

0 引言

在目标表面涂敷吸波材料(radar absorbing material, RAM)是减缩目标雷达散射截面(radar cross section, RCS)的主要方法之一。对飞行器目标所有表面使用吸波材料会使其重量大大增加,严重影响飞行性能及携带载荷的能力。通常的方法是首先找到目标表面的强散射区,然后对这些区域涂敷吸波材料。

在 RCS 减缩中,最重要的工作就是识别“闪烁点”,这些点即是目标表面强散射区域。识别或定位强散射区有几种方法,例如测量、RCS 预估程序以及简便可行的工程猜测等。有经验的 RCS 专家能够凭直觉和经验直接给出目标的强散射源部件,但仍需要得到验证或定量确定,以便设计一种方法去减少散射强度。因此,测量和 RCS 预估程序仍有现实意义^[1]。许多学者对目标局部涂敷 RAM 进行了研

究^[2-6]。文献[7]对复杂目标表面面元的 RCS 进行记录,找到主要回波源,采用物理光学法计算了主要回波源涂覆吸波材料的散射特性。文献[8]通过实验研究了进气道内部 RAM 贴敷长度、贴敷位置等参数对 RCS 减缩效果的影响。

本文首先给出了金属表面涂覆 RAM 的射线追踪法(shooting and bouncing rays, SBR)公式,然后采用 SBR 法对复杂目标表面的强散射区进行求解。根据射线管离开目标表面时的方向确定强散射区,计算分析了强散射区涂敷 RAM 的目标 RCS 减缩特性。

1 涂敷 RAM 的 SBR 法

射线追踪法是处理复杂目标耦合散射的经典方法之一。SBR 法把入射场离散成一系列密集的射线管,对每一根射线管进行反射点和场强追踪,在最后一个反射点处使用物理光学法进行积分,并把所有射线的散射场按相位叠加得到总的

散射场^[9-12]。该方法可以处理表面涂覆吸波材料的情况,并可方便的用于目标局部涂敷 RAM 的计算中^[13]。

如图 1 所示, P_1 为目标表面一个反射点, \hat{i}_1 和 \hat{r}_1 分别为入射方向和反射方向的单位矢量。 e_1^m 和 e_1^p 为入射电场的垂直极化和水平极化的单位矢量; e_1^n 和 e_1^r 为反射电场的垂直极化和水平极化的单位矢量。

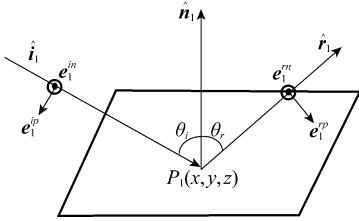


图 1 平面波斜入射

假设射线管在目标表面共反射 n 次,在最后一个反射点处的电场强度表示为^[14]

$$\begin{bmatrix} E_n^m \\ E_n^p \end{bmatrix} = \left[\sum_{q=0}^{n-1} [T_{0r,(q+1)i}] \begin{bmatrix} R_{q\perp} & 0 \\ 0 & R_{q\parallel} \end{bmatrix} \right] \cdot \begin{bmatrix} E_0^m \\ E_0^p \end{bmatrix} \sqrt{\frac{S_0}{S_n}} \cdot \exp\left(-jk\left(\sum_{q=0}^{n-1} d_{q(q+1)}\right)\right) \quad (1)$$

式中, $[T_{0r,1i}]$ 是从射线管起始点处电场坐标 (e_0^m, e_0^p) 向 (e_1^n, e_1^p) 的转换矩阵; E_0^m, E_0^p 为对应于 (e_0^m, e_0^p) 的电场起始分量; d_{01} 为射线管起始点到第一个反射点的距离; S_0 和 S_n 分别为射线管在起始口面和最后一个反射点处的截面积。特殊定义 $R_{0\perp} = R_{0\parallel} = 1$ 。

对于理想导体表面的反射,垂直极化和平行极化的反射系数分别为

$$\begin{cases} R_{\perp} = -1 \\ R_{\parallel} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

但对于金属表面涂敷厚度为 d 、相对介电常数为 ϵ_r 、相对磁导率为 μ_r 的吸波材料, R_{\perp} 和 R_{\parallel} 由下式确定^[4]:

$$R_{\perp} = \frac{\eta_{\perp} \cos \theta_i - 1}{\eta_{\perp} \cos \theta_i + 1} \quad (3)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\eta_{\parallel} - \cos \theta_i}{\eta_{\parallel} + \cos \theta_i} \quad (4)$$

其中

$$\eta_{\perp} = \frac{\mu_r k_0 \tanh(\beta d)}{\beta} \quad (5)$$

$$\eta_{\parallel} = \frac{\beta \tanh(\beta d)}{\epsilon_r k_0} \quad (6)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i} \quad (7)$$

式中, θ_i 为入射角。

由于入射电磁场在入射线面上被划分为彼此紧密相邻的射线管,所以总的散射场为所有射线管的远场散射叠加:

$$E^r = \sum_{p=1}^{n_p} E_p^r \quad (8)$$

式中, E^r 为远区总散射场; E_p^r 为第 P 个射线管的散射场; n_p 为射线管总条数。

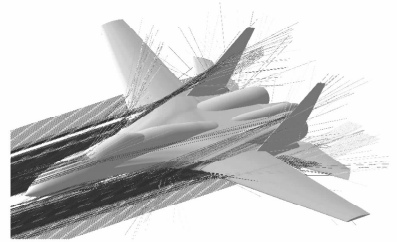
目标的 RCS 为

$$\sigma = 4\pi \left| \frac{E^r \cdot \hat{e}_0^i}{E_0^i} \right|^2 \quad (9)$$

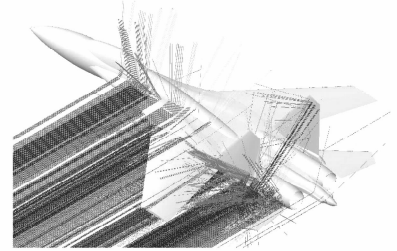
式中, \hat{e}_0^i 为接收机电场方向。

2 强散射区求解

图 2 为不同方位角时的多次反射射线管显示。入射射线管用蓝色表示,每经过一次反射就用一种新的颜色显示射线管,从第一次反射开始依次采用的颜色为:红、绿、粉、紫等。最终离开目标表面的射线管用黄色表示。从图中可以看出,离开目标的射线管朝向各个不同方向,可根据这些射线管的方向确定哪些对后向散射贡献较大。



(a) 头向入射



(b) 侧向入射

图 2 多次反射射线管

如图 3 所示,设 P_n 点为射线管在目标表面最后一个反射点, e_n^n 为 P_n 点处面元的法线方向, e_n^r 为 P_n 点处的反射方向, e^r 为雷达接收方向。由于射线管的能量主要集中在反射方向上,当 e_n^r 和 e^r 之间夹角 θ 较小时,射线管能量大部分返回接收方向,对后向散射贡献较大。而当 θ 较大时,主要能量偏离接收方向,射线管后向贡献较小。可以设定阈值 θ_0 ,当 $\theta < \theta_0$ 时说明该射线管对后向散射贡献较大。

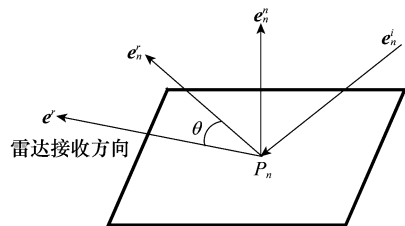


图 3 射线管出射方向与雷达接收方向

对目标表面所有面元进行分类:凡是贡献较大的射线管经过的面元就定义为强散射面元。对于非耦合目标来说,强散射面元的选取相当于筛选法线方向指向接收方向 e' 的面元。而对于耦合目标,经过多次反射后回到接收方向的射线管经过的面元,其法线方向通常与接收方向偏离较大。因此,根据射线管方向确定的强散射面元既包含形成镜面散射的面元,又包含由多次反射形成的强散射面元。对于多次反射的射线管,其经过的所有面元都设为强散射面元。

图 4 为水平面内,方位角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围的目标表面所有强散射区总和,判断时取 $\theta_0 = \pi/6$ 。主要强散射区包括:机身侧面、垂尾内外侧、进气道和尾喷管。机身侧面和垂尾外侧是由镜面散射机理形成的强散射;垂尾内侧、进气道和尾喷管是由耦合效应产生的强散射。而机翼和其他部件形成的耦合效应,由于最终出射方向没有回到接收方向,因此机翼表面基本不属于强散射区,这符合以往对飞机目标主要散射区的判断。

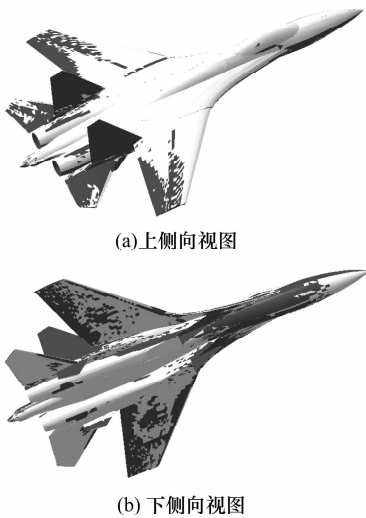


图 4 强散射区显示

3 计算结果分析

图 5 为飞机目标缩比模型的强散射区涂敷 RAM 的雷达散射截面计算结果,计算频率为 3 GHz。RAM 参数为:相对介电常数 $\epsilon_r = 16 \angle 30^\circ$,相对磁导率 $\mu_r = 25 \angle 20^\circ$,涂敷厚度 $d = 2 \text{ mm}$ 。

在大多数角域,RCS 减缩效果明显且较平均。只是在垂直机翼前缘的 $30^\circ \sim 50^\circ$ 范围内 RCS 降低较小,可能的原因是前缘部位曲率变化较大,判断强散射区时取 $\theta_0 = \pi/6$ 只能确定最前端很窄很长的区域为强散射区,由于涂敷面积有限所以 RCS 减缩效果不佳。

表 1 为目标表面强散射区面积和主要威胁角域 ($0^\circ \pm 30^\circ, 90^\circ \pm 30^\circ$) 内 RCS 减缩结果均值。强散射区面积仅为 5.2 m^2 ,占目标表面总面积的 26%,但强散射区涂敷吸波材

料的 RCS 减缩量为 -15.4 dB ,非常接近全部涂覆 RAM 的减缩量 -16.6 dB 。

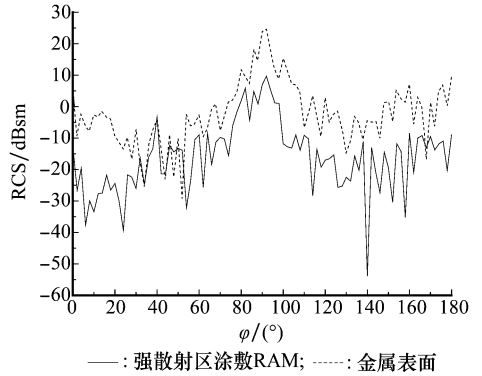


图 5 强散射区涂敷 RAM 结果对比

表 1 强散射区涂敷 RAM 效果

涂敷区域	强散射区	全部涂敷
涂敷面积/ m^2	5.2	20
飞机总面积/ m^2	20	20
强散射区所占比例/%	26	100
主要威胁角域 RCS 减缩量/ dB	-15.4	-16.6

强散射区面积并非一成不变,而是由夹角 θ_0 的大小决定。可以根据 RCS 减缩要求或涂敷重量的限制选择合适的 θ_0 ,以确定最佳的强散射区面积。这在实际应用中是非常方便有效的方法。

图 6 给出了不同 θ_0 取值确定的强散射区涂敷 RAM 的 RCS 计算结果曲线。由于强散射区是在头向和侧向确定的,因此在这些区域三者之间的差距较小,其中 $\theta_0 = 30^\circ$ 时 RCS 值最低。在飞机尾向 ($150^\circ \sim 180^\circ$),当 $\theta_0 = 10^\circ$ 时对尾部强散射源不能很好辨认,因此 RCS 结果偏大。

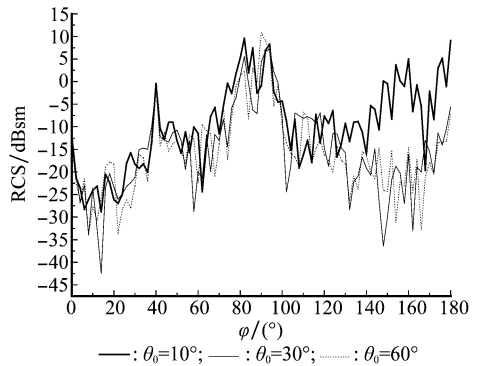


图 6 不同 θ_0 取值的减缩效果对比

表 2 给出了夹角阈值 θ_0 取不同值时的强散射区面积,以及涂敷 RAM 对飞机主要威胁区 RCS 减缩效果的影响。当 $\theta_0 = 30^\circ$ 时 RCS 减缩量最大,为 -15.4 dB ,这对应不惜重代价要达到最大 RCS 减缩量的情况。当 $\theta_0 = 10^\circ$ 时涂敷面积仅为总面积的 13.5%,但减缩量为 -13.3 dB ,这对应以最少的涂敷面积达到较好减缩效果的情况。

当 θ_0 为 45° 和 60° 时,强散射区面积已经超过 30%但

RCS 减缩量却小于涂敷面积仅为 26% 的情况 ($\theta_0 = 30^\circ$)。这是因为与雷达接收方向夹角为 45° 和 60° 的射线管可以跟夹角为 135° 和 120° 的射线管贡献相抵消,对强散射区涂敷 RAM 之后 45° 和 60° 的射线管被削弱了, 135° 和 120° 射线管贡献就突显出来了,因此 RCS 减缩效果反倒不如 $\theta_0 = 30^\circ$ 的情况。

表 2 夹角阈值对涂敷效果的影响

夹角阈值 $\theta_0 / (^\circ)$	10	20	30	45	60
强散射区面积/ m^2	2.7	4.2	5.2	6.1	7.0
飞机表面总面积/ m^2	20	20	20	20	20
强散射区所占比例/%	13.5	21	26	30.5	35
主要威胁角域 RCS 减缩量/dB	-13.3	-14.9	-15.4	-13.4	-13.8

4 结束语

根据射线管出射方向与接收机方向的夹角可以有效确定目标表面强散射区。计算结果显示,对强散射区涂敷 RAM 所需涂敷面积较小,但 RCS 减缩效果非常显著。实际应用中,根据 RCS 减缩指标或涂敷重量的限制选择合适的判断夹角,可以确定最佳的强散射区面积。

参考文献:

- [1] 克拉特 E F. 雷达散射截面——预估,测量和减缩[M]. 北京,电子工业出版社,1988:196-197. (Knott E F. *Radar cross section—prediction, measurement and reduction* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1988:196-197.)
- [2] 马东立, 武哲. 机翼涂敷吸波材料减缩雷达散射截面的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(3): 241-243. (Ma D L, Wu Z. Study on reduction of RCS by coating radar absorbing material for metal wings [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2000, 21(3): 241-243.)
- [3] 王明亮, 高正红. 吸波材料在飞行器隐身设计中的应用研究[J]. 航空计算技术, 2005, 35(4): 45-50. (Wang M L, Gao Z H. Research about designing stealth aircraft by using radar absorbing material [J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2005, 35(4): 45-50.)
- [4] Cai W F, Liu X G, Guo H P, et al. A concise expression for PO method on electromagnetic scattering by arbitrary shaped conducting targets with partially coating [C]// *Proc. of the Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic*, 2003: 469-473.
- [5] Francisco S A, Ivan G D, Oscar G B, et al. Method based on physical optics for the computation of the radar cross section including diffraction and double effects of metallic and absorbing bodies modeled with parametric surfaces[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2004, 52(12): 3295-3303.
- [6] Peixoto G G, Paula A L, Andrade L A, et al. Radar absorbing material (RAM) and shaping on radar cross section reduction of dihedral corners[C]// *Proc. of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronic Conference*, 2005: 460-463.
- [7] 李建辉, 苏东林, 李青, 等. 局部涂敷 RAM 复杂目标的电磁散射特性计算[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(3): 256-259. (Li J H, Su D L, Li Q, et al. Computation of electromagnetic scattering character from complicated object partially coated with RAM[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(3): 256-259.)
- [8] 廖伟, 郭荣伟. 直管斜切式方转圆进气道的电磁散射特性及抑制技术的实验研究[J]. 航空学报, 1999, 20(3): 205-210. (Liao W, Guo R W. Experimental research of RCS and RCSR of a straight rectangle-to-round scoop inlet[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 1999, 20(3): 205-210.)
- [9] Ling H, Chou R C, Lee S W. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(2): 194-205.
- [10] Emidio D G, Fernando B, Marco S. Recent improvement in beam tracing [C]// *Proc. of the IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology*, 2003: 255-256.
- [11] Bhalla R, Ling H. A fast algorithm for signature prediction and image formation using the shooting and bouncing ray technique[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1995, 43(7): 727-731.
- [12] Catedra M F, Perez J, Adana F S, et al. Fast ray-tracing method for calculating the propagation in indoor environments [J]. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1998 (3): 1656-1659.
- [13] 马东立, 武哲. 金属目标表面涂覆吸波材料减缩雷达散射截面的研究[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 18(8): 72-76. (Ma D L, Wu Z. A study on reduction of RCS coating radar absorbing material for metal objects[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1996, 18(8): 72-76.)
- [14] 黄沛霖. 大型、复杂耦合散射目标的 RCS 计算方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003: 24-28. (Huang P L. Research on RCS computing technique of large-scale and complicated coupling scattering object [D]. Beijing: Beihang University, 2003: 24-28.)