

DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2020.01.016

金属介质混合无人机目标强散射区域研究

于家傲, 彭世蕤, 王广学, 王晓燕
(空军预警学院, 湖北武汉 430019)

摘要: 针对无人机具有内部金属结构和薄介质外壳的特点, 基于薄介质层金属表面积分方程的矩量法, 仿真分析了 ABS 塑料、木材和玻璃钢三种典型介质材料作为机体外壳的无人机散射特性。基于其单站 RCS 仿真结果和典型入射方向的等效机体面电流分布情况, 确定了强散射区。通过对强散射区涂覆雷达吸波材料, 有效地降低了机体面电流分布。相比于全身雷达吸波材料涂覆, 所提方法在实现良好的 RCS 减缩效果的同时, 减少了涂覆成本, 研究结果对无人机的隐身设计具有参考意义。

关键词: 无人机; 强散射区; RCS 减缩; 雷达吸波材料

中图分类号: TN011; TN957 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2020)01-0094-08

Strong Scattering Region of Unmanned Aerial Vehicle with Metal and Dielectric Medium

YU Jiaao, PENG Shirui, WANG Guangxue, WANG Xiaoyan
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: According to the feature of UAV with metal structure and thin dielectric shell, based on the moment method of integral equation with thin dielectric and metal, the scattering characteristics of UAV with three typical dielectric coatings, such as ABS plastic, wood and FRP, are simulated respectively. The strong scattering region is determined by monostatic RCS and the equivalent surface current distribution under typical incident direction. The surface current distribution can be effectively reduced by coating the radar absorbing material on the strong scattering region. Compared to coating the radar absorbing material on the whole UAV, the proposed method achieves a good RCS reduction and cut the cost of absorber. The research results have reference significance for the stealth design of the UAV.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); strong scattering region; RCS reduction; radar absorbing material (RAM)

0 引言

在现代军事战争中, 无人机作为新一代飞行作战平台, 可以对战场环境进行临空侦察, 对重要目标实现快速发现、抵近和摧毁。为了提高无人机的生存和突防打击能力, 隐身技术在无人机上得到了广泛的应用。目前隐身技术主要分为隐身外形设计和雷达吸波材料(RAM)涂敷^[1-2]。无论是采用外形技术降低目标的雷达散射截面(RCS), 还是对其表面涂覆 RAM, 飞行器目标 RCS 的评估

分析和掌握目标的强散射区的分布情况是十分重要的。

许多学者对飞行器目标强散射区的提取和局部 RAM 涂敷进行了研究。文献[3]采用物理光学法计算了复杂目标的主要回波源, 并分析了 RAM 涂覆后的散射特性。文献[4]提出了二维高分辨成像及散射中心提取技术, 实现了对隐身飞机散射特性的快速分析。文献[5-6]用高阶矩量法仿真分析了介质涂覆目标的双站散射特性, 为介质涂覆材料在导弹上的设计应用提供了依据。文献[7-8]基于射线追踪法提出了一种确定复杂目标强散射

区的方法,通过涂覆 RAM 实现了目标 RCS 的有效减缩。针对飞行器目标的 RCS 计算多集中于金属结构,其散射特性分析和强散射区提取方法通常基于物理光学、射线追踪和边缘绕射原理,此类分析方法通常忽略目标各部分相互间的耦合效应,虽然具有简便、快速的特点,但仅适用于电大尺寸目标的电磁散射问题,并且对于几何构形复杂或金属介质混合目标则存在一定困难。而无人机多采用金属介质混合目标,针对该类目标电磁散射特性分析的报道还相对较少。

为此,本文从机体等效面电流的角度出发,针对无人机具有内部金属结构和薄介质外壳的特点,基于薄介质金属(TDS-PEC)表面积分方程方法,建立无人机散射问题的电磁场积分方程,通过矩量法求解得到了无人机的面电流分布,仿真分析了 ABS 塑料、木材和玻璃钢三种典型介质材料为外壳的无人机散射特性,基于其单站 RCS 和在典型入射方向上的等效机体面电流分布情况确定强散射区。通过在强散射区涂覆 RAM,给出了针对不同介电常数机体外壳的 RCS 减缩方法,有效地降低了机体面电流分布情况,实现了良好的 RCS 减缩效果。

1 RAM 涂覆目标 RCS 计算理论

1.1 基于薄介质结构的表面积分方程

在雷达常用的 L、S、C 波段,无人机的介质外壳厚度一般都远小于介质波长,薄介质上的场在介质剖面上可认为是常数。针对这种薄介质层结构,采用 TDS-PEC 表面积分方程方法相比于其他全波分析方法,对于计算具有涂覆介质的金属结构目标时,其计算量可以大大减少^[9]。

对于无人机内部金属,其表面的电场积分方程可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\tan}^{\text{inc}}(r) = & j\omega\mu_0 \int_{S_C} \mathbf{J}_C(r') G dS'_C - \\ & \frac{\nabla}{j\omega\epsilon_0} \int_{S_C} \nabla' \cdot \mathbf{J}_C(r') G dS'_C \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_{\tan}^{\text{inc}}(r)$ 为场点 r 处的入射场,下标 tan 表示电场的切向分量; μ_0, ϵ_0 为自由空间的磁导率和介电常数; S_C 表示金属表面; $\mathbf{J}_C(r')$ 为源点 r' 处金属表面的面电流密度; G 为自由空间的格林函数,表

达式为

$$G = \frac{e^{-jk|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \quad (2)$$

式中, k 为自由空间的波数。

对于常规电介质材料的薄机体外壳,其相对磁导率为 $\mu_r=1$,故忽略介质中等效磁流对散射方程的影响,同时认为机体外壳为封闭的壳体,其边缘效应可以忽略,则薄介质中的 TDS 表面电场积分方程可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{inc}}(r) = & \frac{-\tau \mathbf{J}_d}{j\omega\epsilon_0(\epsilon_r-1)} - j\omega\mu_0\tau \int_{S_d} \mathbf{J}_d(r') G dS'_d + \\ & \frac{\tau \nabla}{j\omega\epsilon_0} \int_{S_d} \nabla' \cdot \mathbf{J}_d(r') G dS'_d \end{aligned} \quad (3)$$

式中, τ 为薄介质外壳的厚度, \mathbf{J}_d 为介质壳体上的极化电流,考虑其沿表面同时存在法向分量和切向分量, ϵ_r 为介质壳体的相对介电常数, S_d 表示介质表面。

对于具有吸波特性的超材料介质,其相对磁导率为 $\mu_r \neq 1$,介质中等效磁流对散射方程的影响不可忽略。但其涂覆在闭合金属结构上,则有薄介质中电场的切向分量和磁场的法向分量可以忽略,则闭合金属涂覆吸波超材料的电场积分方程可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\tan}^{\text{inc}}(r) = & j\omega\mu_0 \int_S \mathbf{J}_S(r') G dS' - \\ & \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_S \nabla' \cdot \mathbf{J}_S(r') G dS' - \\ & j\omega\mu_0\chi\tau \int_S \nabla' \cdot \mathbf{J}_S(r') \hat{n} G dS' + \\ & \frac{\chi}{j\omega\epsilon_0} \int_S \nabla' \cdot \mathbf{J}_S(r') G dS' - \\ & \frac{\chi}{j\omega\epsilon_0} \int_{S^+} \nabla' \cdot \mathbf{J}_S(r') G dS'^+ + \\ & j\omega\mu_0(\mu_r-1)\tau \int_S \hat{n} \times \mathbf{J}_S(r') \times \nabla G dS' \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{J}_S(r')$ 为 RAM 涂覆后金属面电流, \hat{n} 为 RAM 材料表面的单位法向量, S 为 RAM 涂覆后金属表面, S^+ 为 RAM 表面,RAM 材料的介电对比度为 $\chi=1/\epsilon_r-1$ 。

将式(1)、式(3)、式(4)组成联立方程,根据矩量法对其用 RWG 基函数进行离散和加权后得到

一系列的矩阵方程,然后在求解该矩阵方程得到所需要的电流系数,即可求得介质和金属上的面电流分布情况。其有效性和准确性在文献[10-11]中进行了验证,本文直接采用该方法对金属介质混合材料无人机的面电流分布情况进行分析。

1.2 RCS 计算

雷达散射截面的一般表达式为

$$\delta = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\mathbf{E}^{sc}|^2}{|\mathbf{E}^{inc}|^2} \quad (5)$$

式中, \mathbf{E}^{sc} 表示散射电场, \mathbf{E}^{inc} 表示入射电场。其中基于 TDS-PEC 方法求解的散射场可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{sc} \approx & -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi r} e^{-jkr} (\hat{\theta}\hat{\theta} + \hat{\varphi}\hat{\varphi}) \cdot \\ & \left[\int_{S_c} \mathbf{J}_c(r') e^{-jk\hat{r}\cdot\hat{r}} dS'_c + \tau \int_{S_d} \mathbf{J}_d(r') e^{-jk\hat{r}\cdot\hat{r}} dS'_d \right] \\ & + \tau \int_S jk(\mu_r - 1) \hat{n} \times \mathbf{J}_s(r') \times \hat{r} e^{-jk\hat{r}\cdot\hat{r}} dS' \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\hat{\theta}, \hat{\varphi}$ 为球坐标系的方向单位矢量。可以看出, 影响远场区域 RCS 由等效极化电流 \mathbf{J}_d 和等效面电流 $\mathbf{J}_c, \mathbf{J}_s$ 决定。因此基于对体面电流的分布情况可以实现对 RCS 强散射区的提取并给出针对性的 RCS 减缩方案。

1.3 RAM 参数设计

具有金属背板的单层 RAM 吸波涂层对于单频点电磁波具有良好的吸波性能, 结构如图 1 所示, 主要设计参数为复介电常数 ϵ 、复磁导率 μ 和涂覆厚度 d , 其中涂覆厚度一般小于 1/4 波长, 复磁导率一般复值模小于 10, 幅角小于 45°^[12]。具体参数可通过传输线理论进行设计。

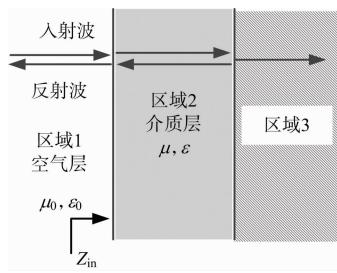


图 1 涂覆单层吸波示意图

根据正入射条件下的传输线理论, 从吸波层表面看向区域 3 的输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{Z_3 + Z_2 \tanh(\gamma d)}{Z_2 + Z_3 \tanh(\gamma d)} \quad (7)$$

其中区域 1 为空气层, 其特性阻抗 $Z_1 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 。区域 2 中介质层的特性阻抗 $Z_2 = \sqrt{\mu/\epsilon}$, 其传播常数 $\gamma = j2\pi\sqrt{\mu\epsilon} = j2\pi/\lambda\sqrt{\mu_r\epsilon_r}$, d 为介质层厚度。当区域 3 中为金属时, 其特性阻抗 $Z_3 = 0$, 当区域 3 为空气时, 其特性阻抗与区域 1 相同 $Z_3 = Z_1$ 。

吸波层表面的电压反射系数为

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_1}{Z_{in} + Z_1} \quad (8)$$

当反射系数 $\Gamma = 0$ 时, 有 $Z_{in} = Z_1$ 。当区域 3 中为金属时, 其特性阻抗 $Z_3 = 0$, 根据式(7)可以得

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(\gamma d) = 1 \quad (9)$$

当区域 2 中的介质参数 μ_r, ϵ_r 和 d 满足方程(9), 则入射波通过区域 2 时, 被区域 2 完全吸收。

当区域 3 为空气时, 其特性阻抗与区域 1 相同, 即 $Z_3 = Z_1$, 当反射系数 $\Gamma = 0$ 时, 根据式(7)可以得

$$\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = 1 \quad (10)$$

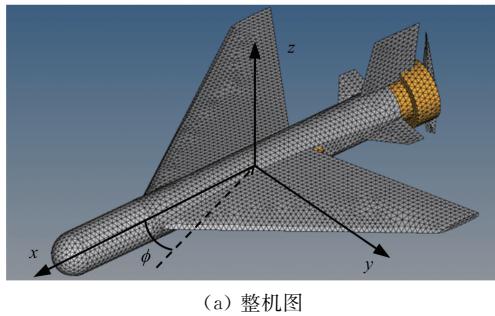
则入射波通过区域 2 时具有透射和吸波特性, 而不具有反射特性。

2 典型介质材料外壳的散射特性分析

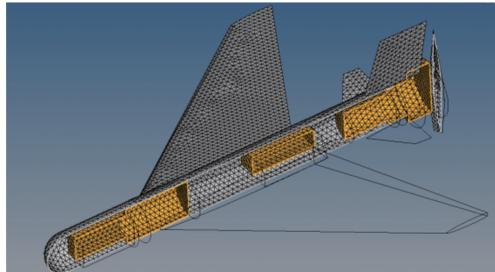
采用 TDS-PEC 方法对 ABS 塑料、木材和玻璃钢三种典型介质材料为机体外壳的金属介质混合无人机目标进行了计算, 给出垂直极化波入射条件下, 水平方位面上的单站 RCS 仿真结果。在实际作战过程中, 无人机的巡航和突防是最主要的两个阶段, 巡航时, 飞机一般作侧向平飞运动, 飞机的侧向暴露给雷达; 而在突防过程中, 飞机的鼻锥方向是威胁最大的方向, 且这两个方向下的无人机单站 RCS 具有较大值。因此将这两个方向作为典型入射方向进行分析, 根据该入射条件下的等效面电流分布情况作为强散射区提取的依据。相对于无人机体坐标系电磁波入射方向如图 2(a)所示, 入射波从水平方位面内入射, 俯仰角为 0°, 方位角为 φ 。当 $\varphi = 0^\circ$ 时, 入射波从机头方向入射; 当 $\varphi = 90^\circ$ 时, 入射波从机身侧向入射; 当 $\varphi =$

180°时,入射波从机尾方向入射。

假设金属介质混合结构无人机身长为1.20 m,翼展为1.06 m。无人机外壳采用介质材料,厚度为5 mm,内部器件为金属结构。利用Solidworks软件建立三维金属介质混合材料无人机模型,通过Hyermesh对模型简化和修复,并产生仿真计算所需的高质量网格^[13],其内部剖面结构如图2(b)所示,灰色部分为介质机体外壳,黄色部分为内部金属结构。仿真分析该目标垂直极化入射条件下的单站RCS,计算频点为3 GHz。



(a) 整机图



(b) 内部剖面图

图2 无人机结构模型

2.1 ABS塑料

ABS工程塑料为最为常见的机体外壳材料,其质量轻,易加工和塑形,是透射性良好的介质材料,其典型的相对介电常数 $\epsilon_r=1.5$, $\tan\delta=0.001$ 。对ABS塑料材质为机体外壳的金属介质混合无人机进行仿真。其水平面上的单站RCS结果如图3中实线所示,可以看出,其主要反射方向为0°,90°,180°,其中0°方向上的散射主要由机头金属部件产生,90°方向上的散射主要由机身侧面金属结构产生,在180°方向散射主要由机尾电机产生,65°方向散射由机头、机身中部结构在该方向的散射同相叠加产生。

仿真分析垂直极化波沿机头方向入射时激励的机体面电流分布如图4(a)所示,沿机身侧向入射时

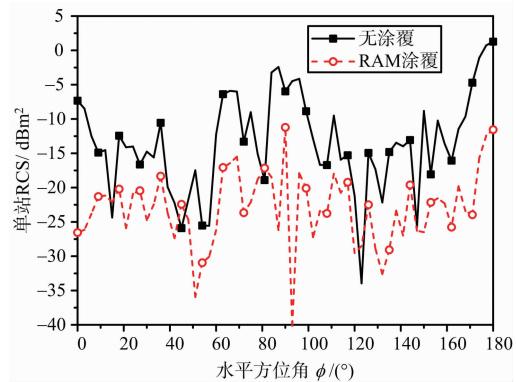
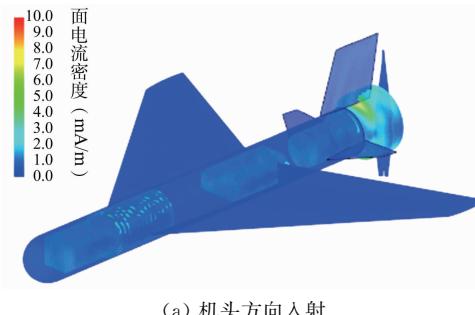
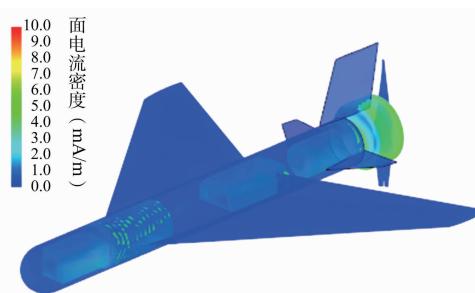


图3 涂覆RAM后无人机单站RCS减缩效果比较

激励的机体面电流分布如图4(b)所示。通过对机体面电流的比较分析发现,机身面电流在机体内部金属部件上分布较强,散射主要由机体内部的金属零件产生,在介质结构机体外壳上并未形成较大的面电流分布,其对目标RCS贡献较小。在机头方向入射时,在机体各个内部金属部件的前端产生了较大的面电流分布,在机身侧向入射时,在机体内部各金属部件的侧面产生了较大的面电流分布,因此确定强散射区为机体内部金属结构。



(a) 机头方向入射



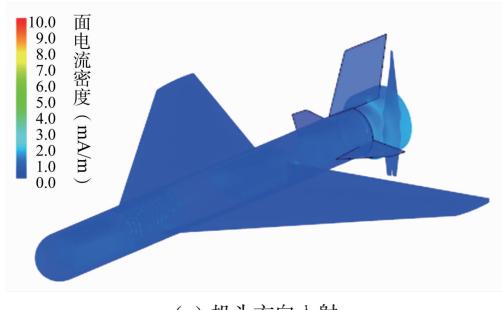
(b) 机身侧向入射

图4 ABS材质无人机的面电流分布

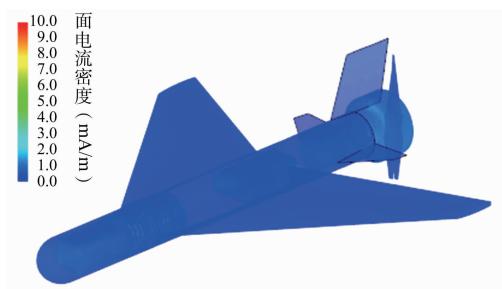
为进一步验证,ABS金属混合材质无人机的强散射贡献区为机体内部金属部件,根据2.2节设计一种工作在3 GHz的薄RAM材料,其RAM参数为:相对介电常数 $\epsilon_r=16\angle 30^\circ$,相对磁导率 $\mu_r=25\angle 20^\circ$,涂敷厚度 $d=2.6$ mm,该参数满足式

(3),使其对 3 GHz 频点的入射波具有良好的吸波效果。

仿真分析 RAM 涂敷在机体内部金属后的无人机散射特性,水平方位面上的单站 RCS 结果如图 3 中虚线所示,可以看出,在大多数角域的单站 RCS 减缩效果明显。在 0° 方向上 RCS 降低了一 19.2 dB,在 90° 方向上 RCS 降低了一 5.2 dB,在 180° 方向上 RCS 降低了一 12.8 dB。在 40° 和 120° 角度上 RCS 降低较小,可能的原因是部分金属结构的边缘为直角结构, RAM 涂覆在金属棱边处时的吸波性能较差,导致 RCS 减缩效果不佳。无人机等效面电流分布情况如图 5 所示,其中在机头方向入射时激励的机体面电流分布如图 5(a)所示,在机身侧向入射时激励的机体面电流分布如图 5(b)所示。可以看出, RAM 涂覆明显降低了内部金属部件上的等效面电流分布情况。对于低介电常数的介质材料,薄机体外壳主要成透波特性,在机体外壳上形成的等效面电流分布较弱,针对机体内部金属部件的 RAM 涂覆可以实现良好的 RCS 减缩效果。



(a) 机头方向入射



(b) 机身侧向入射

图 5 机体内部涂覆 RAM 后无人机面电流分布

2.2 木材

木材为传统的机体材料,具有良好的韧性且不易变形,能在较大的温度范围内保持良好的材料特性,干燥的木材是透射性良好的介质材料,其

典型的相对介电常数为 $\epsilon_r = 2.8, \tan\delta = 0.002$ 。针对机体外壳为木材的金属介质混合无人机,仿真分析其在水平方位面内的单站 RCS。仿真结果如图 6 中实线所示,可以看出,其主要反射方向为 0°, 30°, 70°, 90°, 150° 和 180°, 其中 0° 方向散射主要由机头金属部件产生, 30° 和 70° 方向上的散射主要由机身侧面和机身机翼前沿交汇处产生, 90° 方向散射主要由机身侧面产生, 150° 方向散射由机身中部金属部件和机尾电机在该方向的散射同相叠加产生, 180° 方向散射主要由机尾电机产生。

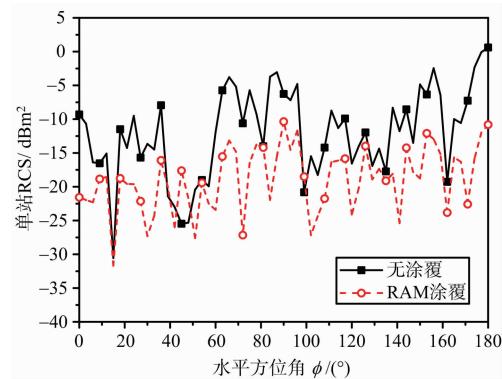
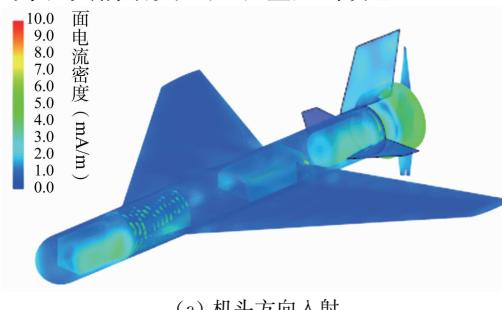
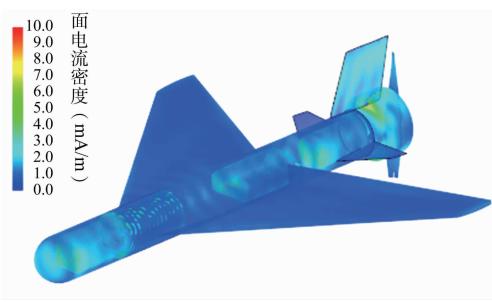


图 6 涂覆 RAM 后无人机单站 RCS 减缩效果比较

垂直极化波在机头方向和机身侧向入射时激励的机体面电流分布如图 7(a)、(b)所示。通过对机体面电流的比较分析发现, 机身面电流在机体内部金属部件上分布较强, RCS 强反射部位主要通过机体内部的金属零件完成, 在机身侧面和机身机翼前沿交汇处, 以及介质材料垂尾上形成了较强的等效面电流分布, 在介质结构的机翼上并未形成较大的面电流分布, 机体外壳整体对 RCS 贡献较小。在机头方向入射时, 在机体各个内部金属部件的前端和介质材料垂尾上产生了较大的面电流分布, 在机身侧向入射时, 在机体内部各金属部件和机身圆柱的侧面产生了较大的面电流分布, 因此确定强散射区为机体内部金属、机身侧面和机身机翼前沿交汇处和垂尾部分。



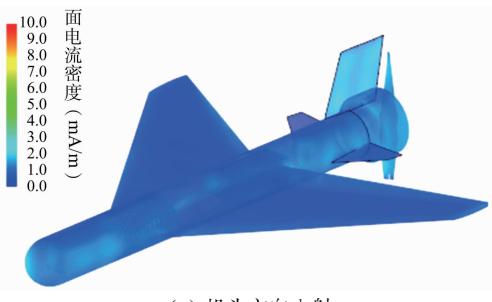
(a) 机头方向入射



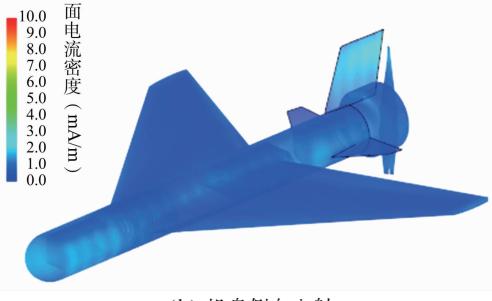
(b) 机身侧向入射

图 7 木材材质无人机的面电流分布

为了实现 RCS 减缩效果,降低机体上产生的等效面电流分布,在强散射区涂覆 RAM,其参数与 2.1 节中的 RAM 参数相同。其水平方位面内的单站 RCS 结果如图 6 中虚线所示,可以看出,在大多数角域的单站 RCS 减缩效果明显,在散射较强的几个方向上均实现了 -7 dB 以上的 RCS 减缩效果。只是在 40° 和 120° 角度上 RCS 降低较小,与 2.1 节中相类似。无人机等效面电流分布情况如图 8 所示,其中在机头方向入射时激励的机体面电流分布如图 8(a)所示,在机身侧向入射时激励的机体面电流分布如图 8(b)所示。可以看出,RAM 涂覆明显降低了强散射区上的等效面电流分布情况,实现了良好的 RCS 减缩效果。



(a) 机头方向入射



(b) 机身侧向入射

图 8 机体内部涂覆 RAM 后无人机面电流分布

2.3 玻璃钢

除了低介电常数的薄介质材料,玻璃钢常作

为无人机机体外壳来改善机体强度,其具有质轻而硬、不导电、机械强度高、耐腐蚀等特性。由于所使用的树脂和纤维材料不同,材料的电参数差异较大,且具有较大的介电常数和损耗正切值。这里选取一种常用的环氧树脂玻璃纤维作为机体外壳,其典型相对介电常数为 $\epsilon_r = 4.5$, $\tan\delta = 0.005$ 。对金属介质混合无人机的水平方位面内的单站 RCS 进行仿真,仿真结果如图 9 中实线所示,可以看出,由于金属外壳的散射特性增强,无人机在多个入射方向上均具有较强的散射特性。

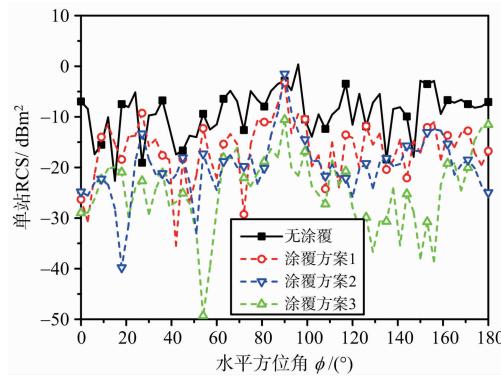
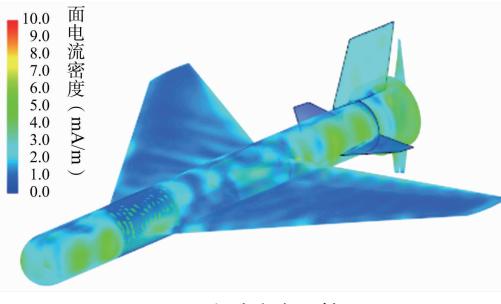
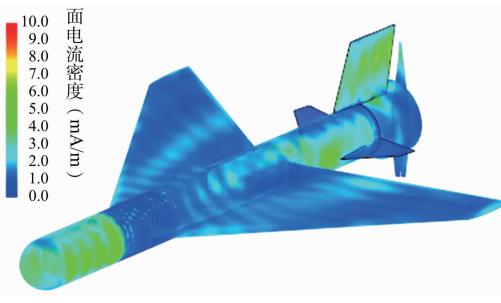


图 9 涂覆 RAM 后无人机单站 RCS 减缩效果比较

机体面电流分布如图 10 所示,当入射波从机头方向入射时形成的机体面电流分布如图 10(a)所示,当入射波从机身侧向入射时形成的机体面电流分布如图 10(b)所示。通过对机体面电流的



(a) 机头方向入射



(b) 机身侧向入射

图 10 玻璃钢材质无人机的面电流分布

比较分析发现,机体外壳介质的相对介电常数升高,其散射作用更加明显,在机体外壳上形成的等效面电流变大,其对 RCS 的贡献不可忽略。在机头方向入射和机身侧向入射时,由于机体外壳的散射和耦合作用,机身内部金属部件的前端和侧向均产生了较大的面电流分布,且在介质材料的垂尾和机翼上也形成了较强的面电流分布。

为了降低玻璃钢金属混合材质无人机的 RCS,根据其介质机体外壳的等效面电流分布特性,提出 3 种 RAM 涂覆方式,方案 1 只对内部金属部件上涂覆 RAM 材料,其参数与 2.1 节中的材料参数相同。方案 2 对全机身涂覆具有金属衬底的 RAM 材料,方案 3 在机体内部涂覆 RAM,同时在机体外壳中添加铁氧体粉末,增加材料的相对磁导率^[14-15],设机体外壳的相对磁导率与相对介电常数相等,通过式(10)可以看出,此时材料的反射特性较小,主要体现为透射或吸波特性。

仿真分析 3 种方案的 RCS 减缩性能,对于采用涂覆方案 1 的无人机,其在水平方位面上的单站 RCS 仿真结果如图 9 中的红色圆圈标记的虚线所示。在机体外壳材质的相对介电常数较高时,只对内部金属部件涂覆 RAM 的减缩效果并不理想,在 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 和 140° 等方向上几乎没有减缩效果。对其在机头方向入射和机身侧向入射时形成的机体面电流分析如图 11 所示,可以看出相比于

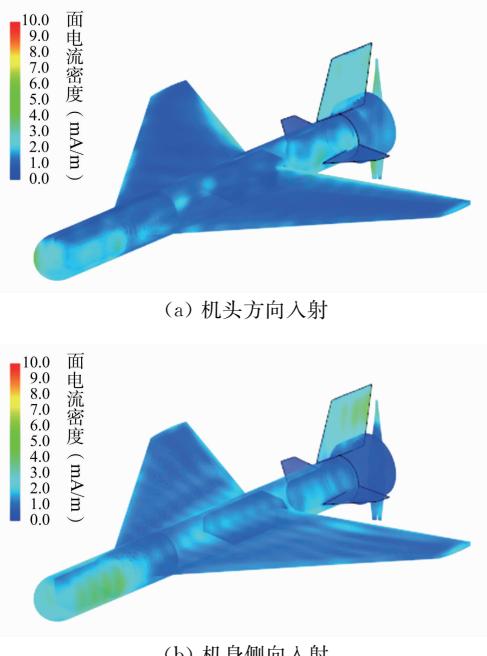


图 11 机体内部涂覆 RAM 后无人机面电流分布

低相对介电常数的介质,方案 1 仍在玻璃钢材质的机体外壳上形成了较大的面电流分布情况,其对 RCS 的贡献较大,仅对机体内部金属部件无法实现较好的 RCS 减缩效果。

采用减缩方案 2 的无人机,其在水平方位面上的单站 RCS 仿真结果如图 9 中蓝色倒三角标记的虚线所示,其整体 RCS 减缩效果略好于方案 1,但在 $30^\circ, 90^\circ, 140^\circ$ 方向上的减缩效果较差。在机头方向入射和机身侧向入射时形成的机体面电流如图 12 所示,方案 2 降低了无人机整机的面电流分布效果,但大尺寸的介质机体外壳均对 RCS 产生了贡献。在机头、机翼前缘和机身外壳侧向部位存在曲率变化较大区域,该部位上 RAM 的吸波效果较差,虽然对整机进行了 RAM 材料涂覆,但其带来的减缩效果并不明显,且全机涂覆需要较高的 RAM 材料成本。

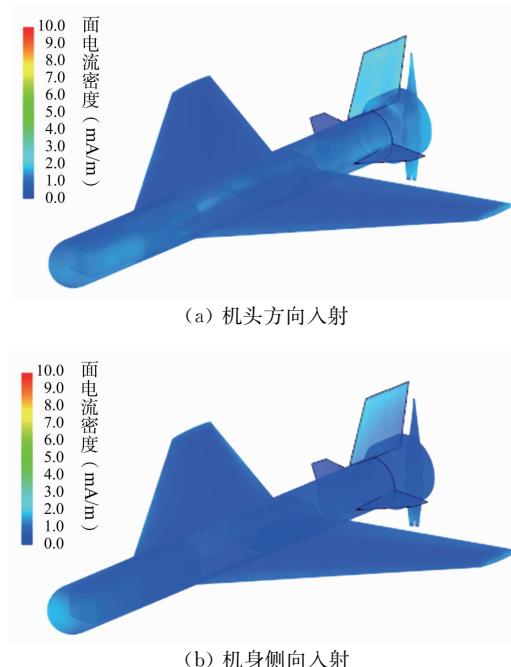


图 12 全机身涂覆 RAM 后无人机面电流分布

对于采用涂覆方案 3 的无人机,其在水平方位面上的单站 RCS 仿真结果如图 9 中的绿色正三角标记的虚线所示,其整体 RCS 减缩效果相比与方案 1、2 更为明显,在 0° 方向上 RCS 降低了 -22.0 dB,在 90° 方向上 RCS 降低了 -7.9 dB,在 180° 方向上 RCS 降低了 -5.8 dB。对其在机头方向入射和机身侧向入射时形成的机体面电流分析如图 13 所示,由于调整了机体外壳材料的相对磁导率,改善了介质结构机身对电磁波的透射性能,使其机

身上形成的等效面电流大大降低,使得对 RCS 贡献的等效面电流分布集中在内部金属部件上,并通过涂覆 RAM 的方式进行集中吸收,最后实现了良好的 RCS 减缩效果。

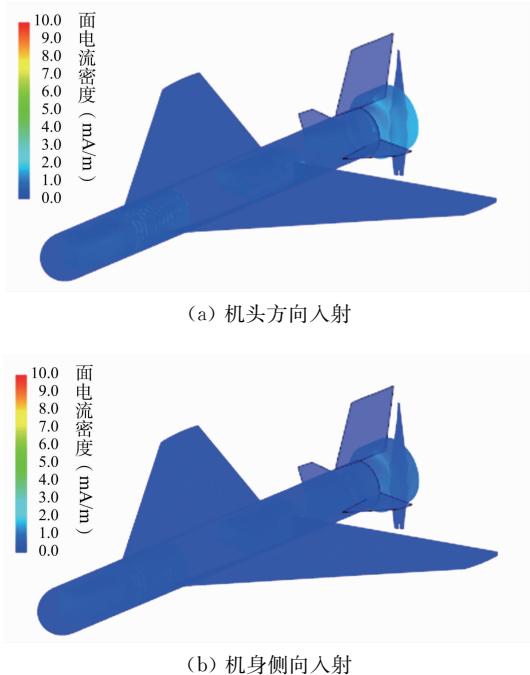


图 13 透射性材料机体外壳和内部涂覆 RAM 后无人机面电流分布

3 结束语

本文从机体等效面电流的角度出发,针对无人机具有内部金属结构和薄介质外壳的特点,基于 TDS-PEC 方法建立无人机散射问题的电磁场积分方程,通过矩量法求解得到了无人机的面电流分布,分析其单站 RCS 特点和在典型入射方向时的等效机体面电流分布情况,并确定强散射区。通过对强散射部位涂敷 RAM 材料,降低了机体面电流分布,实现了良好的 RCS 减缩效果。当机体外壳的介电常数较低时,其强散射区主要集中在内部金属结构上,随着介电常数的增加,其薄介质外壳对 RCS 的贡献不可忽略,并在壳体上形成新的强散射区。通过改善非金属材质机体外壳的透射性,使得强散射区域集中在具有 RAM 涂覆的内部金属结构上,相比于全身 RAM 涂覆,实现了良好的 RCS 减缩效果的同时,减少了 RAM 的涂覆成本,研究结果对无人机的隐身设计具有参考意义。

参考文献:

- [1] 刘春阳. 无人机隐身技术若干问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [2] GUAY R, DROLET G, BRAY J R. Measurement and Modelling of the Dynamic Radar Cross-Section of an Unmanned Aerial Vehicle[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(7):1155-1160.
- [3] ALGAR DIAZ M J, LOZANO L, MORNEO J, et al. An Efficient Hybrid Technique in RCS Predictions of Complex Targets at High Frequencies[J]. Journal of Computational Physics, 2017, 345:345-357.
- [4] 宁超, 张向阳, 肖志河. 隐身飞机散射特性综合分析研究[J]. 制导与引信, 2009, 30(2):34-38.
- [5] 周超, 张小宽, 赵辉. 介质涂覆目标电磁散射特性计算与仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(10):120-123.
- [6] DAULT D, SHANKER B. A Mixed Potential MLFMA for Higher Order Moment Methods with Application to the Generalized Method of Moments[J]. IEEE Trans on Antennas & Propagation, 2016, 64(2):650-662.
- [7] 刘忠铁, 马东立, 楚亮. 复杂飞行器目标强散射区求解及 RCS 减缩[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8):1694-1697.
- [8] JI Jinzu, LIU Jun, MA Yunpeng. Triangular Ray Tubes in Electromagnetic Scattering Calculation Using Shooting and Bouncing Ray (SBR)[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(5): 3117-3120.
- [9] 侯禄平. 介质载体上共形微带天线的分析与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [10] 刘文静. 薄介质涂覆目标电磁散射特性的分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [11] 余泽太. 复杂目标的近场电磁散射及 RCS 外推研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
- [12] 许兆鹏, 王孝通, 朱涛, 等. 多层雷达吸波材料涂层反射系数的研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(8): 23-26.
- [13] 刘香岚, 彭世蕤, 于家傲, 等. 基于并行 MLFMA 的金属介质混合目标 RCS 计算[J]. 空军预警学院学报, 2017, 31(1):11-14.
LIU Xianglan, PENG Shirui, YU Jiaao, et al. RCS Computation of Metal Dielectric Mixture Target Based on Parallel MLFMA[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2017, 31(1): 11-14. (in Chinese)

(下转第 108 页)