

武装直升机雷达散射截面计算及雷达吸波材料影响分析

陈 炆 招启军 蒋相闻 蒋勇猛

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学国家级重点实验室,南京,210016)

摘要: 为提高直升机雷达散射特性预估的准确性,建立了目标雷达散射特性分析的计算电磁学(Computational electromagnetics method,CEM)方法,并开展了吸波涂层对直升机雷达散射截面(Radar cross section,RCS)特性影响的研究。首先,对复杂目标(例如直升机)进行几何建模和网格划分,获得空间网格单元上的电磁场信息,作为整个电磁场仿真分析的计算基础。然后,通过介质球和涂覆电磁介质导体球的算例对比,分析结合共形技术的时域有限差分法(Finite difference time domain,FDTD)在处理介质物体及涂覆涂层介质物体的有效性,结果表明 FDTD 方法计算结果与级数解吻合。在此基础上,计算和对比了金属旋翼以及涂覆吸波涂层旋翼的 RCS 特性,分析了典型方位角入射下全机涂覆前后对 RCS 特性的影响。研究表明:旋翼表面全涂覆雷达吸波材料(Radar absorbing material,RAM)后对直升机旋翼的 RCS 抑制效果明显,在全机强散射部位涂覆 RAM 可以显著地降低 RCS 特性,涂层的使用在直升机的隐身设计中起到关键的作用。

关键词: 直升机;旋翼;时域有限差分法;共形技术;涂层;雷达吸波材料;雷达散射截面

中图分类号: V218

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)01-0075-08

Radar Cross Section Calculation on Armed Helicopter and Effect Analyses of Radar Absorbing Material

CHEN Yang, ZHAO Qijun, JIANG Xiangwen, JIANG Yongmeng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Rotorcraft Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to improve the prediction accuracy of radar scattering characteristics of helicopters, the computational electromagnetics (CEM) method is established to analyze radar scattering characteristics, and the influence of coating on radar cross section (RCS) characteristics is studied. First of all, geometric model and mesh generation for complex target (such as helicopter) are conducted and the electromagnetic field information on the space grid unit is obtained for the simulation and analysis of the electromagnetic field. Secondly, the finite difference time domain (FDTD) method combined with conformal technique is effective in the treatment of dielectric objects and equivalent impedance method for dielectric coated objects through the calculations on the dielectric ball and the conductor ball coated with electromagnetic medium. The results show that the calculation results of the FDTD method agree well with the series solution. Then, the RCS characteristics of the metal rotor and the coated rotor are calculated and compared, and the influence of RCS on the characteristics of the fuselage before and after the coating is analyzed at different angles of incidence. It is demonstrated that the RCS reduction effect is obvious through the rotor surface coated with radar absorbing material (RAM). The whole body coating in the strong scattering parts can significantly reduce RCS and the

收稿日期: 2017-12-15; **修订日期:** 2018-09-30

通信作者: 招启军,男,教授,博士生导师, E-mail: zhaqijun@nuaa.edu.cn。

引用格式: 陈炆,招启军,蒋相闻,等. 武装直升机雷达散射截面计算及雷达吸波材料影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(1): 75-82. CHEN Yang, ZHAO Qijun, JIANG Xiangwen, et al. Radar Cross Section Calculation on Armed Helicopter and Effect Analyses of Radar Absorbing Material[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(1): 75-82.

use of coating plays a key role in the design of stealth helicopter.

Key words: helicopter; rotor; finite difference time domain method (FDTD); conformal technique; coating; absorbing material; radar cross section(RCS)

武装直升机凭借火力强、机动性好的卓越性能在争夺低空制空权中发挥着越来越重要的作用,是现代立体合成作战中不可缺少的高技术装备^[1]。然而,随着现代战争中各种目标特性的精确探测设备的相继出现,使得直升机作战环境变得更加严酷、复杂。因此,准确地预估目标的雷达散射截面(Radar cross section,RCS)是进行武装直升机隐身设计的前提^[2],通过开展武装直升机的雷达散射截面特性计算及涂覆吸波材料(Radar absorbing material, RAM)影响分析,发现强散射源并通过涂覆吸波涂层材料减缩直升机的雷达散射截面,对增强武装直升机雷达隐身性能具有重要的实际意义和工程价值。

对于典型几何形状或简单结构目标的电磁散射问题,解析方法可将未知量表示为已知函数的显式,从而计算出解析解。但是在电磁系统变得复杂时,例如对包含不同介质或具有复杂几何外形的目标,解析法无法进行有效的计算,这时就需要用到计算电磁学^[3] (Computational electromagnetics method, CEM)方法。近年来,随着计算机硬件技术的发展,计算电磁学方法的发展速度也与日俱增。由于其高精度的特点,在处理复杂外形的多介质目标电磁散射等对精度要求较高的问题的计算中具有明显优势。此外,CEM方法在涂覆目标的电磁计算应用也取得了快速发展。1990年,Kishk等人^[4]使用阻抗边界条件方法计算了金属基底表面涂覆磁损耗介质目标的 RCS; Ellacott 等人^[5]使用时域有限差分法(Finite difference time domain, FDTD)方法研究了涂覆各向同性介质的复杂目标的 RCS; Dey 和 Mittra^[6]提出了基于三维理想导体弯曲表面的局部共形网格的时域有限差分方法(Conformal FDTD, CFDTD); Waldschmidt 等人^[7]研究了由三角面元拟合的三维模型的共形网格划分方法;郑宏兴等人^[8]使用 FDTD 对涂覆各向异性介质导体的 RCS 进行了研究;姜彦南^[9]应用并行 FDTD 方法计算了多层介质目标的电磁散射特性,并研究了多种边界条件的影响;胡晓娟^[10]研究了处理涂覆介质理想导体表面共形网格的多种剖分方法;蒋相闻等人^[11-14]基于面元边缘法,结合准静态法和时频分析法研究了考虑微多普勒效应的旋翼雷达特征信号,模拟评估了计入旋翼动态影响的全机 RCS 综合特性,开展了直升机布局的气动/

雷达隐身综合特性优化及应用研究,提出了具有实际意义的四级雷达预警机制。可见,目前的研究大多集中于在天线及固定翼飞行器的涂层研究,对武装直升机的旋翼、机身等复杂结构外形上涂覆吸波材料的隐身性能分析方面的研究并不多见。因此,发现旋翼和全机的强散射部位,并通过涂覆 RAM 减缩全机散射特征,对新一代隐身直升机研制具有重要的参考价值。

鉴于此,国内外在涂覆介质电磁散射问题计算方法方面的研究已经较为成熟,本文针对武装直升机复杂的外形特点,建立了基于 FDTD 方法的雷达散射截面预估方法,对直升机旋翼以及全机涂覆吸波材料的 RCS 减缩特性进行了分析,拟得到减缩武装直升机 RCS 的方法。

1 计算方法

1.1 理想导体表面的共形网格技术

基于理想导体表面的共形网格,由于磁场的计算是通过相邻四周的电场得出的,而理想导体内的电场值始终为零,而且目标表面与网格面并不是完全重合的,因此在计算网格中心的磁场分量时,需要对磁场的迭代公式进行修正处理。

在处理复杂模型的共形网格时,可以简化为 3 个二维平面内的共形网格进行处理,以 xoy 面为例,推导出修正后的二维共形网格磁场迭代公式^[15]。法拉第感应定律为

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \iint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B} 为磁场强度。

法拉第感应定律应用于二维平面上的共形网格,如图 1 所示。

由于理想导体内电场为零,电场贡献由理想导体外的部分提供,得到 xoy 面上共形网格磁场迭代

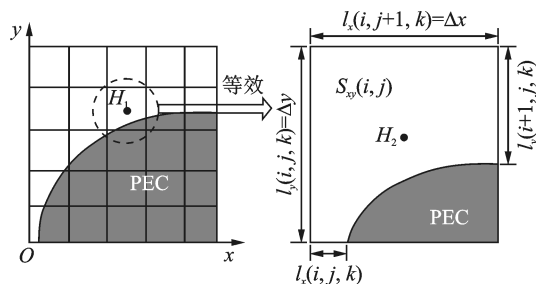


图 1 二维共形网格单元示意图

Fig. 1 Schematic of two-dimensional conformal grid unit

公式

$$H_z n + \frac{1}{2}(i, j) = H_z n - \frac{1}{2}(i, j) + \frac{\Delta t}{\mu S(i, j)} \left[\frac{E_x^n(i, j + \frac{1}{2})l_x(i, j) - E_x^n(i, j - \frac{1}{2})l_x(i, j - 1)}{-E_x^n(i + \frac{1}{2}, j)l_y(i, j) - E_y^n(i - \frac{1}{2}, j)l_y(i - 1, j)} \right] \quad (2)$$

式中: l_x 和 l_y 分别为弯曲表面处变形网格中棱边在理想导体外的长度, $S_{xy}(i, j)$ 为该共形网格单元在 xoy 面内理想导体外的面积, 长度参数和面积参数均已在图1中标示出来。其余两个磁场分量分别在 xoz 和 yoz 面内进行求解, 电场的迭代公式不需要做任何修改, 直接以一般的FDTD计算公式求解得到。

上述共形网格的处理过程中会由于质量较差的网格单元的存在而引起计算的稳定性变差, 因而对于生成的共形网格应尽量满足如下两个基本条件: (1) 共形网格在导体外部的面积应该大于整个网格单元面积的5%。(2) 共形网格中的相对边长的最长值与该网格相对面积的比率应小于12。

此外, 在进行网格划分时需要考虑色散误差的要求, 假设网格单元为立方体, 即 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta$, λ_{\min} 表示入射波波长的最小值, 此时为保持计算的稳定性, 网格尺寸应满足

$$\delta \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \quad (3)$$

采用上述的网格生成方法, 以存在解析解的金属导体球的单站 RCS 模型为例来分析网格尺寸的大小与计算精度之间的平衡关系。球的半径为 1 m, 平面入射波取频率为 0.3 GHz 的正弦波, 经 Mie 级数方法计算出的解析解为 4.95 dBsm。图2给出了网格取不同尺寸时的 RCS 计算值与解析解的对比, 可以看出, 当网格尺寸为 $\lambda/10$ 和 $\lambda/20$ 时, 误差相对而言较大; 网格尺寸为 $\lambda/30$, $\lambda/50$, $\lambda/100$ 的误差比较小, 分别为 3.03%, 2.32%, 1.86%, 相互之间的差值不到 1%, 但是内存与计算时间相差越来越大。这里仅仅是以半径 1 m 的球作为算例计算, 对于后面需要仿真的直升机模型而言, 内存与计算时间的增加将导致计算机的计算能力无法承受, 为了兼顾计算精度与计算效率, 本文仅针对低频段直升机隐身问题开展研究, 并选取 $\lambda/30$ 的网格尺寸作为元胞的最小划分尺寸。

1.2 涂覆导体目标的共形网格技术

通常针对这种基于完全导体的共形网格技术, 在导体表面附近可分为3种不同材料的网格单元部分, 分别是导体材料、涂层材料和真空介质。

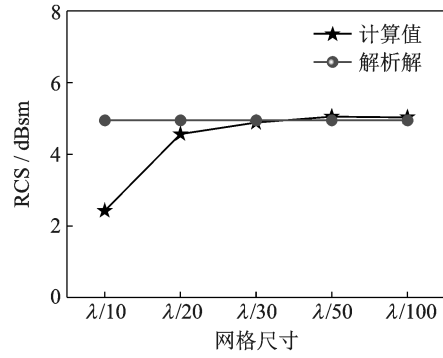


图2 金属球 RCS 的计算值与解析解的对比

Fig. 2 Contrast of RCS of calculated value of metal ball and analytical solution

如图3所示, 在导体表面取出一个共形网格单元进行分析, A, B, C, D 分别为不同材料网格位置处的电场采样点, F 为涂层内某处的磁场采样点。

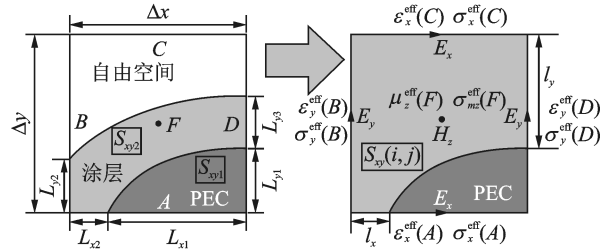


图3 表面涂层的共形网格示意图

Fig. 3 Schematic of conformal meshes of surface coating

由于 A 点处在导体网格单元的棱边上, 其等效介质参数可以假设为涂层材料的参数特性; 同样 B 点处于涂层和真空部分共同拥有的棱边上, 因而 B 点处的参数可等效地设定为涂层和真空在棱边上的长度占比加权求得; C 点处的参数即为真空中的电磁介质参数; D 点所处的边包含了3种材料的参数特性, 这里与 B 点的处理方式一样, 通过涂层和真空在边上的长度占比加权求得; 由于 F 点处在涂层材料内部, 其磁场等效参数由共形网格单元内涂层和真空的面积占比加权求得。

$$\begin{cases} \epsilon_x^{\text{eff}}(A) = \epsilon_2 \\ \epsilon_y^{\text{eff}}(B) = \frac{L_{y2}\epsilon_2 + (\Delta y - L_{y2})\epsilon_0}{\Delta y} \\ \epsilon_x^{\text{eff}}(C) = \epsilon_0 \\ \epsilon_y^{\text{eff}}(D) = \frac{L_{y3}\epsilon_2 + (\Delta y - L_{y1} - L_{y3})\epsilon_0}{\Delta y} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_x^{\text{eff}}(A) = \sigma_2 \\ \sigma_y^{\text{eff}}(B) = \frac{L_{y2}\sigma_2}{\Delta y} \\ \sigma_x^{\text{eff}}(C) = 0 \\ \sigma_y^{\text{eff}}(D) = \frac{L_{y3}\sigma_2}{\Delta y - L_{y1}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϵ_0, σ_0 和 ϵ_2, σ_2 分别为自由空间和涂覆介质的介电常数与电导率; L_{y1} 和 L_{y3} 分别表示网格右侧边上理想导体和涂敷介质所占的长度; L_{y2} 表示网格左侧边上涂敷介质所占的长度; L_{x1} 和 L_{x2} 分别表示下网格边上理想导体和介质所占的长度。

因而,点 F 处的等效磁导系数和等效导磁率可依据网格单元内除去理想导体外的涂层介质和自由空间所占面积的加权平均求得

$$\begin{cases} \mu_z^{\text{eff}}(F) = \frac{(\Delta x \Delta y - S_{xy1} - S_{xy2})\mu_0 + S_{xy2}\mu_2}{\Delta x \Delta y - S_{xy1}} \\ \sigma_{mz}^{\text{eff}}(F) = \frac{S_{xy2}\sigma_{m2}}{\Delta x \Delta y - S_{xy1}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_{xy1}, S_{xy2} 分别表示该网格上理想导体和涂层介质所占的面积,长度参数和面积参数均已在图 3 中标示出来。

1.3 电磁计算网格生成

网格生成技术对于计算电磁学方法的计算尤为重要,对于复杂外形的物体而言,为了描述物体细节处的结构形状,基本网格单元通常需要划分的很小,而细小的网格尺寸必然会导致计算量的指数增长,计算机内存及运行时间都会急剧增加。因而为了节省计算机内存和运行时间,通常会对复杂目标模型采用合适的网格剖分技术,即网格单元在整个计算区域内保持较大尺寸的同时,通过细化局部网格达到提高计算精度以及适当减少计算时间的目的,本文采用的网格剖分技术主要是亚网格技术和共形网格技术:(1)亚网格技术:亚网格技术的划分原则是在目标结构复杂的计算区域采用细网格划分,在目标结构简单的计算区域采用粗网格划分。(2)共形网格技术:对于具有复杂弯曲表面的目标,阶梯近似后的物体与原始物体的外形有较大的误差,采用共形技术可使得表面网格划分更加贴近实际目标。图 4 给出了某型武装直升机全机表面的电磁网格及其头部、侧面和尾部网格的局部放大图。

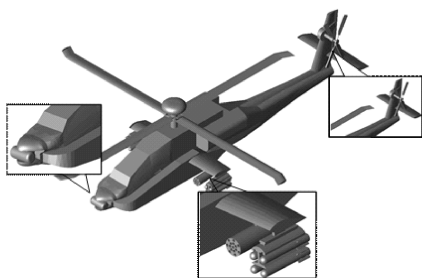


图 4 全机表面电磁计算网格

Fig. 4 Electromagnetic grid on surface of helicopter

依据上述的网格技术基础,图 5 给出了整个武装直升机的 RCS 特性求解流程:

(1) 前处理模块

确定旋翼的结构参数和机身布局参数,在旋翼及机身表面设置涂层的厚度大小,建立对应的 CAD 模型,确定旋翼、机身及涂层的材料参数,在计算域内划分计算用的电磁计算网格单元,读入网格信息(包含了位置坐标和材料参数等信息)。

(2) 求解器模块

首先进行计算域初始化,设定电磁介质参数、入射波角度和极化方向等参数,设定各处的边界条件(连接边界、截断边界和输出边界),计算涂覆涂层的等效介质参数,开始时间推进,求解网格单元处的电磁场分量,进行电磁场的时间迭代,最后通过残值约束条件,判断是否满足收敛条件。

(3) 后处理模块

通过时频域转换和近远场变换对电磁场量分析处理,计算出雷达波入射平面内的双站 RCS 分布和目标空间内的多个剖面散射场云图,进行外形结构和雷达吸波材料对旋翼和全机的 RCS 特性的影响分析,拟获得指导直升机隐身设计的结论。

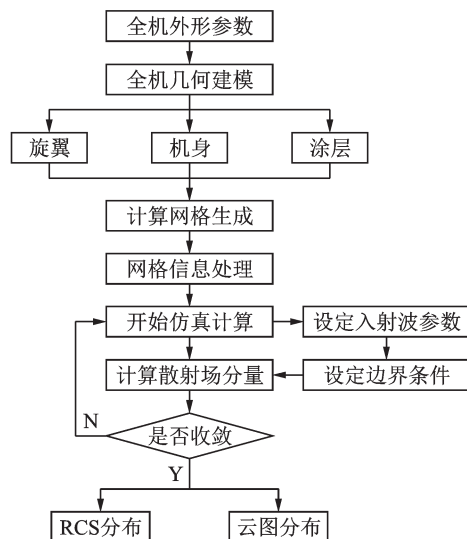


图 5 全机 RCS 特性求解流程图

Fig. 5 Flow chart of RCS for helicopter

2 算例验证

为了验证上述方法计算三维目标雷达散射特性的高精度特性以及在处理涂覆介质问题上的有效性,分别选用金属导体球和有耗介质材料涂覆处理后的导体球的双站 RCS 模型进行仿真分析。

2.1 金属导体球

图 6 给出了导体球的双站 RCS 计算值与解析解的对比,球的半径选取为 1 m,入射波为 0.3 GHz 的正弦平面波。可以看出,采用 CFDTD 方法计算的 RCS 分布与解析解吻合,而高频法(PO)计算值与解析解相差甚远,证明了本文 CFDTD 方法的有效性与高精度特性。

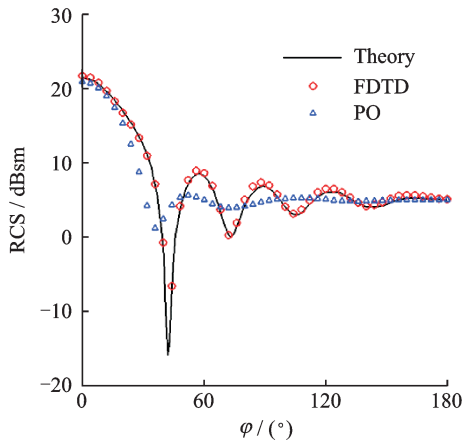


图6 导体球的双站RCS分布

Fig. 6 Bistatic RCS distribution of metal ball

2.2 表面涂覆涂层的导体球

理想导体球的半径 $r=0.75\text{ m}$, 金属导体球表面外涂覆有耗电磁性介质材料, 涂层的厚度为 $d=10\text{ m}$, 此材料的介电系数选取为 $\epsilon_r=(4, -1)$, 磁导系数为 $\mu_r=(3, -1)$, 入射平面波设定为正弦波, 频率大小为 0.3 GHz , 自由空间内的波长 $\lambda=1\text{ m}$ 。

图7给出了用理想导体表面涂覆涂层的FDTD方法计算涂覆导体球的双站RCS与Mie级数解的对比。可以看出, 使用CFDTD方法计算涂覆电磁性介质导体球的RCS分布与Mie级数解结果相吻合, 说明本文建立的电磁仿真方法在处理涂覆介质材料问题方面具有较高的精度。

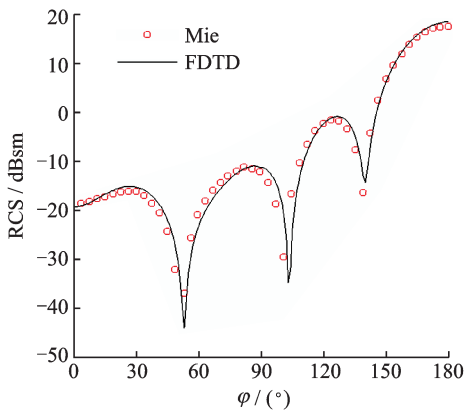


图7 涂覆金属球双站RCS分布

Fig. 7 Bistatic RCS distribution of coated metal ball

3 武装直升机 RCS 特性及 RAM 影响

本文采用的直升机是一款单旋翼带尾桨构型的武装直升机, 该直升机的基本参数如表1所示, 模型主要采用建模软件的曲面造型设计模块完成。

表1 武装直升机的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of armed helicopter rotor

参数	数值
机长/m	17.76
机宽/m	3.59
机高/m	4.05
桨叶片数	4
桨叶弦长/m	0.534
旋翼直径/m	14.63

3.1 涂覆RAM对旋翼RCS特性的影响

翼面类部件是直升机的一个重要散射源, 考虑到针对旋翼的外形结构还是以满足气动性能为主, 在旋翼表面涂覆吸波材料可最大限度地保证旋翼的气动特性不受影响。为了研究涂覆型吸波材料对旋翼RCS特性的影响, 采用吸波材料对金属桨叶表面进行涂覆处理, 选取某种涂层介质的电磁参数为 $\epsilon_r=4.7$, $\sigma=1.668 \times 10^{-3}\text{ S/m}$, $\mu_r=1.6$, $\sigma_m=1421\text{ }\Omega/\text{m}$, 取涂层厚度为 2 mm 进行计算研究, 雷达波选取频率为 0.3 GHz 的正弦波, 雷达波从方位角为 0° 的位置入射, 接收器从 0° 旋转至 360° 。图8给出了雷达波照射旋翼及接收器位置的示意图。

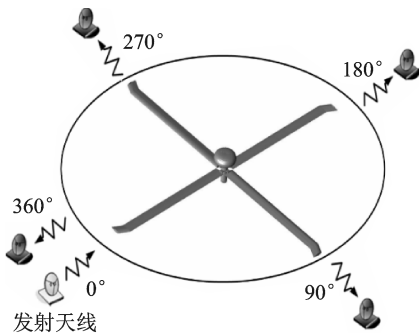


图8 雷达波水平面内照射旋翼示意图

Fig. 8 Rotor under radar illumination in horizontal

图9给出了旋翼表面全涂覆RAM前后的RCS分布对比。可以看出, 4片桨叶的旋翼RCS极大值出现在方位角为 0° 与 180° 时, 涂覆RAM后RCS极大值所在的方位并未变化, 这主要是由于桨叶两端面受到雷达波的垂直照射引起了强镜面反射, RCS缩减幅度并不大, 而在方位角为 90° 与 270° 附近减缩效果比较明显。

图10给出了金属旋翼与涂覆RAM旋翼附近的散射场云图。可以看出, 涂覆RAM旋翼水平面的散射场强度明显降低了许多主要是表面涂覆的雷达吸波材料对散射波的吸收作用, 导致旋翼系统整体散射水平降低。可见, 只要选择了合适的吸波材料就能有效地减弱旋翼的RCS特性。

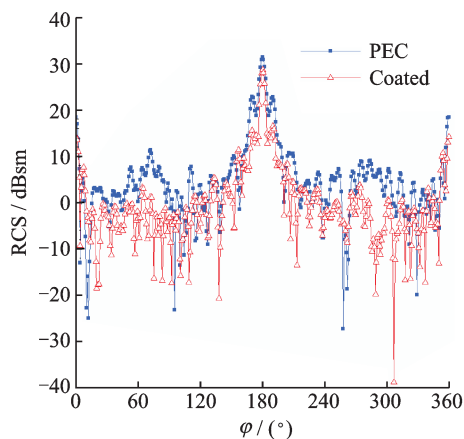


图 9 涂覆RAM前后的RCS分布对比

Fig. 9 Contrast of RCS distribution of rotor before and after being coated with RAM

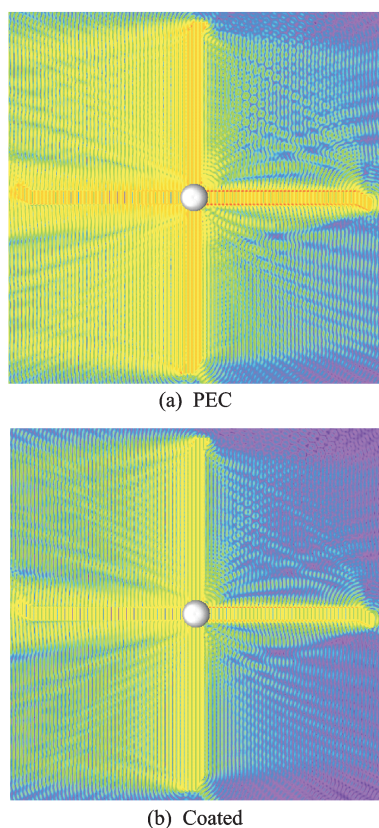


图 10 涂覆RAM前后的水平剖面散射场对比

Fig. 10 Contrast of scattering field in horizontal section before and after being coated with RAM

3.2 涂覆RAM对全机RCS特性的影响

与3.1节中旋翼表面涂层的计算方法相同,雷达波选用0.3 GHz和1.0 GHz的正弦波分别从全机的鼻锥(0°)、侧向(90°)和尾追(180°)3个典型方位照射全机模型,雷达接收天线由 0° 逆时针转动至 360° 方位,间隔为 1° 。图11为雷达波照射全机的双站模型示意图。

图12给出了全机强散射部位涂覆RAM前后

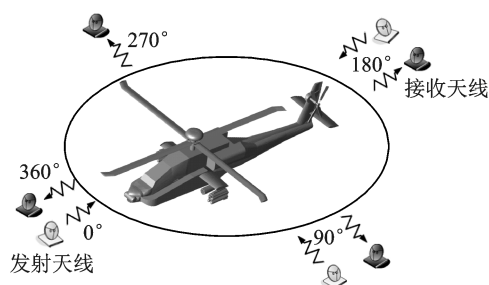


图 11 雷达波照射全机的双站模型示意图

Fig. 11 Helicopter under radar illumination

的散射电场云图,入射方向取 0° 入射时的分析。对比发现,涂覆后计算域内的电场强度与金属机身的电场强度相比减弱了,这体现了涂覆RAM后的全机计算域内的电磁场强度明显降低。可见,广泛地在全机表面涂覆吸波材料对直升机全机雷达散射特性的降低是一种行之有效的方法。

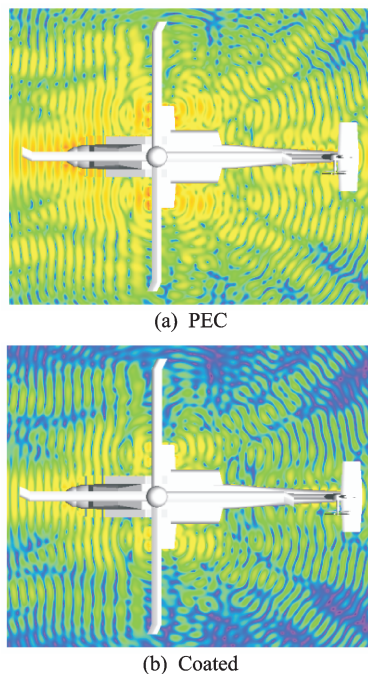


图 12 全机涂覆RAM前后的水平剖面散射场对比

Fig. 12 Contrast of scattering field of helicopter in horizontal section before and after being coated with RAM

图13给出了全机涂覆RAM前后RCS分布的对比。由图13(a,c)可见,当雷达波从机身的鼻锥和尾追方向入射时,涂覆RAM前后的RCS极大值均出现在 0° 和 180° 方位,表明鼻锥和尾追角域范围是直升机全机较易被探测到的危险区域,经雷达吸波材料全涂覆后的机身除了在前向方位RCS值下降不明显,其余方位RCS减缩效果明显。图13(b)给出了雷达波从侧面直接入射机身时全机RCS的分布,涂覆前后的RCS极大值出现在左侧(90°)和右侧(270°)方位,表明全机在侧向方位引起的镜面

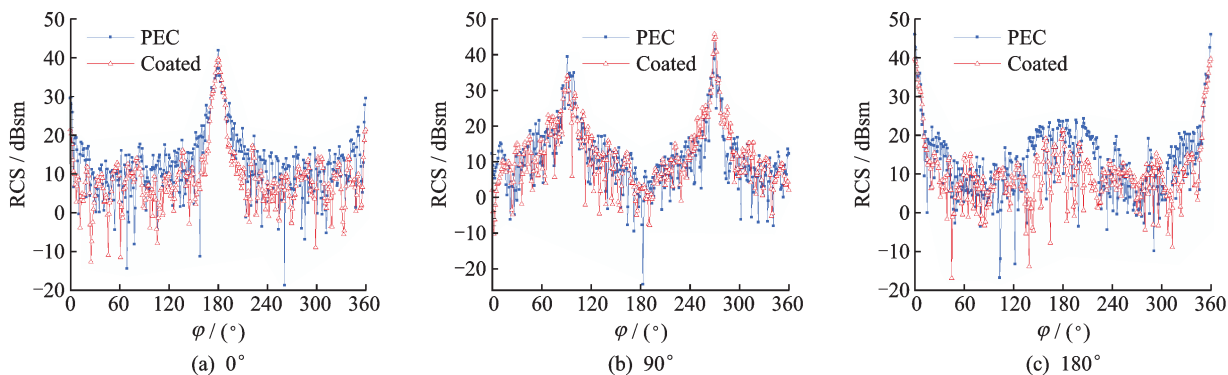


图13 全机涂覆RAM前后RCS分布对比

Fig. 13 Contrast of RCS distribution of helicopter before and after being coated with different incident angles

反射较强,涂覆吸波材料后,90°和270°方位涂覆前后的RCS值相差不大,说明吸波材料对于机身侧面产生的镜面反射的吸收能力较弱,鼻锥范围(−30°~30°)与尾追范围(150°~210°)角域内,RCS均值下降明显,这说明了此类吸波材料对于绕射波与爬行波的吸收能力较强。

图14给出了两个频率下全机涂覆RAM前后RCS均值的对比,通过使用吸波材料对全机强散射部位进行涂覆处理,在0°,90°,180°方位入射时,RCS均值在0.3 GHz的入射波下分别降低了4.04,1.76,3.04 dBsm,相比于金属全机RCS均值分别下降了38.04%,15.34%,27.86%,可见在前向入射时的减缩效果比较好,后向次之,侧向最差;同样入

射波以1 GHz的频率从3个方位照射全机时,RCS均值分别减小了3.73,1.73,3.23 dBsm,相比于金属材料的全机RCS均值分别下降了29.86%,14.34%,24.88%,可见在选取的3个方向下的RCS均值下降都比较可观,涂覆后的全机隐身性能得到了明显提升。

4 结 论

为了提高直升机RCS特性的预估精度,本文建立了基于CEM方法的直升机RCS数值模拟方法,并对旋翼和全机强散射部位涂覆吸波材料的RCS进行了计算和分析,获得了以下结论:

(1)旋翼表面全涂覆RAM后对桨毂和桨叶边缘这些强散射部位RCS抑制效果明显。表明在选择合适的涂覆RAM后,能够有效地降低旋翼的RCS。因此,在进行隐身设计时,完全能够在对旋翼气动特性影响很小的情况下,获得明显的隐身性能提升。

(2)全机外形结构上曲率较大的鼻锥和尾追以及曲率较小的侧面护板是机身的重要强散射部位,在涂覆RAM的隐身设计中需要着重考虑。

(3)由不同方位入射下的全机涂覆前后RCS的对比可知,在垂直于机身表面的镜面反射情况下,涂覆RAM的吸收能力较弱,但对边缘绕射波和爬行波吸收效果较好。

(4)在全机强散射部位表面涂覆RAM使得不同方位的RCS均值都有所降低,显著地提升直升机的隐身性能,减弱了全机周围的散射场强度,因此涂覆RAM作为一种有效减缩RCS的手段在设计中可以重点考虑。

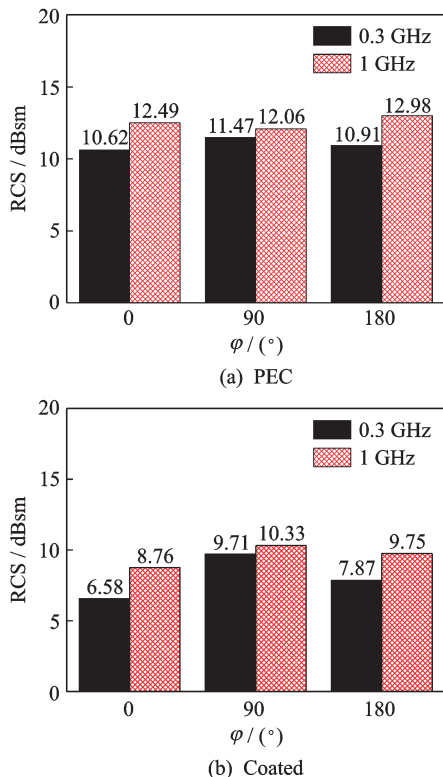


图14 全机涂覆RAM前后的RCS均值对比

Fig. 14 Contrast of RCS means of helicopter before and after being coated with RAM

参考文献:

- [1] SWEETMAN B. Stealth aircraft [M]. Shrewsbury:

- Airline Publishing Ltd, 1986.
- [2] HARPER W H, MORRIS J J. Maximizing operational effectiveness on RAH-66 Comanch[C]//Proceedings of American Helicopter Society 48th Annual Forum. Los Angeles, California, USA: [s. n.], 1992.
- [3] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [4] KISHK A A, GORDON R K. Electromagnetic scattering from conducting bodies of revolution coated with thin magnetic materials [J]. *Magnetics IEEE Transactions on*, 1994, 30(5):3152-3155.
- [5] ELLACOTT D, WOOD G, JEPPS G. Electromagnetic modelling of coated structures using the FDTD method[C]//IEEE Colloquium on Low Profile Absorbers and Scatterers. [S. l.]: IET, 1992:8/1-8/4.
- [6] DEY S, MITTRA R. A locally conformal finite-difference time-domain (FDTD) algorithm for modeling three-dimensional perfectly conducting objects [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1997, 7(9):273-275.
- [7] WALDSCHMIDT G, TAFLOVE A. Three-dimensional CAD-based mesh generator for the Dey-Mittra conformal FDTD algorithm [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52 (7) : 1658-1664.
- [8] 郑宏兴, 葛德彪, 魏兵. 用FDTD方法计算二维各向异性涂层目标的 RCS[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(1):4-6.
- ZHENG Xiongxing, GE Debiao, WEI Bing. Two dimension anisotropic coated object RCS computed by FDTD algorithm [J]. *System Engineering and Electronics*, 2003, 25(1):4-6.
- [9] 姜彦南. FDTD并行算法及层状半空间散射问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- JIANG Yannan. Study of parallel FDTD algorithm and EM scattering in layered half-space[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2009.
- [10] 胡晓娟. 复杂目标电磁散射的FDTD及FDFD算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- HU Xiaojuan. Study of FDTD and FDFD algorithms for electromagnetic scattering by complex targets[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2007.
- [11] 蒋相闻, 招启军. 考虑旋翼调制影响的直升机 RCS 特性分析及评估[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(4): 824-834.
- JIANG Xiangwen, ZHAO Qijun. Analysis and evaluation on RCS characteristics of helicopter considering modulated effect of rotor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(4):824-834.
- [12] 蒋相闻, 招启军, 孟晨. 直升机旋翼桨叶外形对雷达特征信号的影响[J]. *航空学报*, 2014, 35(11):3123-3136.
- JIANG Xiangwen, ZHAO Qijun, MENG Chen. Effect investigations of helicopter rotor blade shape on its radar signal characteristics[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(11):3123-3136.
- [13] 蒋相闻. 直升机气动/雷达隐身特性综合优化设计及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- JIANG Xiangwen. Integrated optimization design and application on aerodynamic / radar stealth characteristics of helicopter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016.
- [14] 蒋相闻, 招启军. 直升机翼面类部件雷达目标特性分析及评估[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(11):2691-2700.
- JIANG Xiangwen, ZHAO Qijun. Analysis and evaluation about radar target scattering characteristics of armed helicopter wing components [J]. *Journal of Aeronautical Dynamics*, 2016, 31(11):2691-2700.
- [15] LI Qingliang, DONG Hui, TANG Wei, et al. A simplified CFDTD algorithm for scattering analysis[C]//2003 6th International Symposium on Antennas and Propagation and EM Proceedings. Beijing, China: [s. n.], 2003:404-407.

(编辑: 孙静)