

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.02.001

共轴旋翼高速直升机雷达散射截面计算及雷达吸波材料影响分析

李程 招启军 陈炆 蒋相闻

(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:为准确高效地预估共轴旋翼高速直升机的雷达散射特性,结合雷达吸波材料(Radar absorbing material, RAM)在隐身设计中的应用,开展了共轴旋翼高速直升机雷达散射截面(Radar cross section, RCS)特性及涂覆型 RAM 对其影响的研究。首先,基于计算涂覆目标表面散射的物理光学法(Physical optics, PO)和计算涂覆边缘绕射的等效电磁流法(Method of equivalent current, MEC),建立了计算 RCS 的高频方法,并通过涂覆了 RAM 的金属球和直升机矩形桨叶算例验证了其有效性。在此基础上,研究双旋翼、尾部螺旋桨、平垂尾和机身在鼻锥、侧向和尾追 3 个典型方位的雷达散射特性和强散射源分布,并采用局部涂覆 RAM 的方法进行隐身设计。研究表明:尾部螺旋桨、共轴旋翼桨毂及其整流罩部位、机身上曲率较大的鼻锥和尾部以及曲率较小的侧面护板是机身的重要强散射部位。在强散射部位涂覆 RAM 能有效降低高速直升机各方位双站 RCS 的均峰值,显著提升高速直升机隐身性能的效果。

关键词:高速直升机;雷达散射截面(RCS);共轴旋翼;高频方法;雷达吸波材料(RAM)

中图分类号:V218;TN974 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2017)02-0147-07

Radar Cross Section Calculation on Coaxial Rotor High-Speed Helicopter and Effect Analyses of Radar Absorbing Material

LI Cheng, ZHAO Qijun, CHEN Yang, JIANG Xiangwen

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

Abstract: In order to accurately and efficiently estimate the radar scattering characteristics of coaxial rotor high-speed helicopters, the radar cross section (RCS) characteristics of coaxial rotor high-speed helicopters and the influence of coated radar absorbing materials (RAM) on them are studied according to the application of RAM in stealth design. Firstly, the high-frequency method for calculating RCS is established based on the physical optical (PO) method for calculating the coating surface scattering of the target and the method of equivalent current (MEC) for calculating the coating edge diffraction. The effectiveness of the high-frequency method is proved by the calculation of the metal ball and the rectangular paddle of the helicopter coated with RAM. The radar scattering characteristics and the strong scattering source distribution of the two polar azimuths and the fuselage in the nasal cones, lateral and tail trapping are studied, and the method of locally coating RAM is used to stealth design. The study shows that the coaxial rotor hub and its fairing parts, the larger curvature of the nose and tail and the smaller curvature of the side fence are important strong scattering parts of the body. Strong scattering parts coated with RAM can effectively reduce the high-speed helicopter RCS in all the direction, and significantly

收稿日期:2016-12-15; **修订日期:**2017-03-01

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:李程,招启军,陈炆,等.共轴旋翼高速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,2017,49(2):147-153. LI Cheng, ZHAO Qijun, CHEN Yang, et al. Radar cross section calculation on coaxial rotor high-speed helicopter and effect analyses of radar absorbing material[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(2): 147-153.

improve its stealth performance.

Key words: high-speed helicopter; radar cross section; coaxial rotor; high frequency method; radar absorbing materials

共轴旋翼高速直升机较其他构型的高速直升机具有巡航速度快、机动性好、结构紧凑、低速性能和悬停性能优异等优点,更适用于起降场地限制较大、且要求飞行器具有较好悬停性能和机动性能的现代战场^[1]。随着雷达探测技术的发展,高速武装直升机的作战环境变得愈发恶劣,所以其隐身性能也成为气动性能设计之外的一项重要设计指标^[2]。目前,由于涂覆型雷达吸波材料(Radar absorbing material, RAM)吸收性能好、使用方便灵活、容易调节、对武器装备的外形不需任何改动等优点而受到世界各国的重视,几乎所有的隐身武器上都使用了涂覆 RAM,其在现代隐身技术中具有广阔的发展前景^[3]。随着 RAM 技术应用越来越广泛,如何准确、高效地预估涂覆 RAM 的目标雷达散射截面(Radar cross section, RCS)也成为雷达目标隐身性能研究中的重点。

RCS 数值计算主要分为频域和时域方法。物理光学法(Physical optics, PO)^[4]是应用最为广泛的高频方法之一,求解电磁散射问题时,其具有计算效率高、资源消耗低的优点,在分析电大尺寸目标电磁散射特性时极具优势。高频方法研究较早,应用领域也较广,早期曾被广泛应用于电磁散射和辐射问题的求解中。2003年,Johnsen^[5]等研究了双/多基地雷达目标特性,并测量了悬停状态下直升机的双/多基地 RCS 特性。Pouliguen^[6]等采用物理绕射理论对直升机旋翼的双站 RCS 进行了计算,并分析了回波的信号特征。Misiurewicz^[7]等研究分析了直升机旋翼及桨毂的 RCS 特性。Clemente 和 Soraghan^[8]在外场直升机动态回波测量试验的基础上,研究了旋翼在无源双基地雷达探测下的微多普勒回波信号特征。中国国内这方面研究起步相对较晚。1994年,马东立和武哲^[9]利用 PO 法计算了飞机翼面类部件的 RCS。蒋相闻^[10]等基于面元边缘法分析评估了直升机翼面类部件的雷达目标特性,并对直升机全机的 RCS 响应特性进行了计算与分析。刘军辉^[11]等在微波暗室中对涂覆 RAM 的直升机旋翼模型进行了 RCS 的测量。可以看出,目前国内外的研究大多集中于单旋翼带尾桨的常规构型直升机,以天线、材料电磁环境影响、简单旋翼单一因素响应特性分析或回波信号特征方面研究为主,而对共轴双旋翼高速直升机应用 RAM 的隐身性能分析方面的研究并不多见。

鉴于此,针对共轴刚性双旋翼高速直升机的外

形特点,本文拟建立用于分析涂覆介质目标雷达目标特性的高频方法,开展共轴旋翼、机体布局及涂覆 RAM 对高速直升机雷达散射特性影响的分析。

1 计算方法

1.1 涂覆表面散射的计算

PO 是用散射体表面的感应电流取代散射体本身,通过对表面感应场的近似和积分来计算目标的远区散射场。根据 Stratton-Chu 公式,在平面波入射情况下,物体表面散射场 E^s 的计算公式为^[12]

$$E^s = \frac{jk}{4\pi r} \int_S (ZJ_s - s \times M_s) \exp[jkr \cdot (i - s)] ds \quad (1)$$

式中: i, s 分别表示入射方向和观察方向的单位矢量; r 为表面上一点的位置矢量; k 和 Z 分别为自由空间内的波数和波阻抗; S 为目标表面的照明区; J_s, M_s 分别表示物体的表面电流与表面磁流。

图 1 为在理想导体平板表面涂覆厚度 d 的各向同性有耗介质涂层的表面散射示意图。通常采用多边形面元近似表示目标表面的曲面,其散射问题就转化为涂覆介质的平面元散射问题。

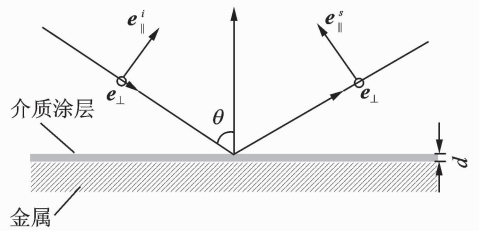


图 1 涂覆介质金属目标表面散射示意图

Fig. 1 Schematic diagram about surface scattering on coated metal targets

为了简化分析,通常在涂层与自由空间界面上施加合适的阻抗边界条件,通过参照对应的涂覆介质的平面散射问题,确定与材料散射特性相关的反射系数,进而求出目标表面的散射场。设

$$e_{\perp} = \frac{i \times n}{|i \times n|}, e_{\parallel}^i = i \times e_{\perp}, e_{\parallel}^s = e_{\perp} \times s \quad (2)$$

式中: $e_{\perp}, e_{\parallel}^i, e_{\parallel}^s$ 分别为垂直极化方向、入射平行极化方向和散射平行极化方向的单位矢量。设 E_{\perp} 和 E_{\parallel} 分别为入射电场在 e_{\perp} 上和 e_{\parallel}^i 的分量, R_{\perp} 和 R_{\parallel} 分别为涂覆表面在垂直极化和水平极化情形下的反射系数,则有

$$\begin{cases} \mathbf{E}^i = E_{\perp} \mathbf{e}_{\perp} + E_{\parallel} \mathbf{e}_{\parallel}^i \\ \mathbf{E}^r = R_{\perp} E_{\perp} \mathbf{e}_{\perp} + R_{\parallel} E_{\parallel} \mathbf{e}_{\parallel}^r \end{cases} \quad (3)$$

当积分表面是理想导体时,在垂直极化和水平极化条件下,反射系数分别为 $R_{\perp} = -1$, $R_{\parallel} = 1$ 。只涂覆一层各向同性介质时,垂直极化和水平极化的反射系数分别为

$$R_{\perp} = \frac{Z_{\perp} \cos\theta_i - 1}{Z_{\perp} \cos\theta_i + 1} \quad R_{\parallel} = \frac{Z_{\parallel} - \cos\theta_i}{Z_{\parallel} + \cos\theta_i} \quad (4)$$

为便于计算,引入 RCS 的复数平方根形式

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi} R \frac{\mathbf{E}_s \cdot \mathbf{e}_r}{E_0} e^{-jkr} \quad (5)$$

式中: \mathbf{e}_r 为雷达接收方向的单位矢量; E_0 为入射电场幅值; R 为目标到观察点的距离。将式(1)代入式(5),可得到

$$\sqrt{\sigma} = \frac{jk}{2\sqrt{\pi} E_0} \cdot \int_s T \cdot e^{jkr \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{s})} ds \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} T = & (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{e}_{\perp})(1 - R_{\perp}) \cdot E_{\perp} \cos\theta + \mathbf{e}_r \cdot \\ & (\mathbf{n} \times \mathbf{e}_{\perp}) \cdot (1 + R_{\parallel}) E_{\parallel} - \\ & (\mathbf{e}_r \times \mathbf{s}) \cdot \mathbf{e}_{\perp} (1 - R_{\parallel}) E_{\parallel} \cos\theta + (\mathbf{e}_r \times \mathbf{s}) \cdot \\ & (\mathbf{n} \times \mathbf{e}_{\perp})(1 + R_{\perp}) \cdot E_{\perp} \end{aligned} \quad (7)$$

在求解整个目标的 RCS 时,需要将所有面元的贡献叠加起来,对每个面元都要进行式(6)的面积分。实际计算中,将目标表面离散成小三角形面元,求出每个面元的 RCS 贡献,再将所有面元的贡献叠加起来,便可以求得式(6)的积分,从而得到整个目标的 RCS。

1.2 涂覆边缘绕射的计算

为了克服物理光学法没有考虑边缘绕射的缺陷,采用等效电磁流法(Method of equivalent current, MEC)计算边缘绕射贡献。按照 MEC 的原理,对于任何有限电磁流分布的绕射场,可以通过积分求和方法求得有限的场值。其等效垂直与水平极化一次绕射场的反射系数可以用两个劈面的反射系数近似表示。其等效的反射系数^[13]为

$$R_{\text{wedge}}^{\perp, \parallel} = \begin{cases} R_1^{\perp, \parallel} & \text{仅面“1”被照射} \\ R_2^{\perp, \parallel} & \text{仅面“2”被照射} \\ (R_1^{\perp, \parallel} + R_2^{\perp, \parallel})/2 & \text{两面同时被照射} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $R_1^{\perp, \parallel}$ 为劈的上表面对应于入射方向的垂直/水平极化反射系数; $R_2^{\perp, \parallel}$ 为劈的下表面对应的垂直/水平极化反射系数;当两个表面同时被照射时,等效反射系数取两者的平均值。修正后,不考虑高次绕射的计算涂覆棱边绕射场的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_d = & \frac{jk}{4\pi R} \left[ZI' \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{t}) + M'(\mathbf{s} \times \mathbf{t}) \right] \\ & \exp[jkr \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{s})] dl \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $I' = R_{\text{wedge}}^{\parallel} I$; $M' = R_{\text{wedge}}^{\perp} M$ 。

目标的边缘可以通过对棱边的识别进行提取,对于单个棱边该积分则是解析可积的。式(9)的积分计算可以通过将边缘曲线划分为若干小直线段,计算每个小直线段的绕射场再进行矢量叠加的方法来求得总绕射场。

1.3 电磁计算网格生成

PO 方法的计算网格用一系列三角形面元和棱边来描述复杂目标。根据 RCS 计算与面元大小的影响分析,通常以小面元代替原始曲面所造成拱高误差应小于雷达波长的 $1/16$ 。因此生成的网格密度和尺度符合曲面片上任意一点到该处替代的电磁面元的距离小于 $\lambda/16$ (λ 为波长)。对于机体表面曲率较大的地方,网格应相对密一些,如旋翼、尾螺旋桨和垂直尾边缘等处,必须划分足够密的网格。图 2 给出了 X-2 直升机全机表面的三角形面元网格及其旋翼、尾部网格的局部放大图。

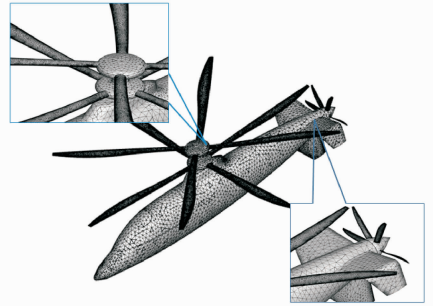


图 2 X-2 全机表面三角形面元网格

Fig. 2 Triangular element grid on surface of X-2 helicopter

在 PO+MEC 的高频方法中,雷达波照射目标时,目标的表面被分为两个部分:照明区和暗区。处于暗区或被遮挡的面元和边缘对后向散射场没有贡献,本文应用计算机图形学中消隐方法来判断、处理遮挡问题。具体方法如下:

(1) 首先判断目标表面是否处于照明区(设入射方向法矢为 \mathbf{i} , 面元外法矢为 \mathbf{n}), 如果 $\mathbf{i} \cdot \mathbf{n} \geq 0$, 则为暗区; 如果 $\mathbf{i} \cdot \mathbf{n} < 0$, 则为照明区。

(2) 将所有处于照明区的面元和边缘投影到垂直于雷达波入射方向的平面上,并在投影平面上计算这些网格面元的中心。

(3) 通过网格中心在投影平面上的位置关系来判断各面元在雷达波入射方向上的重叠遮挡位置关系。

(4) 在入射方向上对重叠的面元按入射方向坐标值(深度)进行排序,深度越小则该面元越靠近雷达波源,深度最小的面元即为最上层的面元。

通过以上的处理,便可以将最上层面元几何信息提取出来,去除被遮挡部分的面元和边缘对后向

散射场的贡献。

对于具有绕射效应的棱边信息,可以通过面法矢的计算得到(这里的棱边信息包括棱边的起始顶点、终止顶点和棱边的内角等)。要判断网格边是否为棱边,可以按以下步骤进行:

(1)判断所有网格边中的公共边。若两个三角形面元有两个公共的顶点,那么以这两个点为顶点的边就是这两个三角形的公共边。

(2)通过检查两个三角形面元的外法矢夹角的余弦值是否超过给定的门限值来判断这条边是不是棱边。具体来说,对于第 i 条边,计算共享该边的两个三角形面元的外法矢的夹角 α ,按照网格剖分误差要求设定一个门限值(假设是 $\theta \geq 100^\circ$),若 $\alpha \geq \theta$,则判定该边为棱边,其起始点和终止点可通过查网格点数据获取,棱边的内角由 $180^\circ - \alpha$ 得到。

(3)令 $i = i + 1$,直至遍历所有的边。

通过以上处理,棱边的方向矢量、节点坐标等量就可以确定,便可以将目标上的棱边信息提取出来,进行边缘绕射的计算。

2 算例验证

为了验证上述方法计算三维涂覆介质目标 RCS 特性的有效性,现分别选用涂覆了 RAM 薄层的理想导体球和单片平直桨叶的双站 RCS 模型进行计算分析。

2.1 表面涂覆 RAM 的金属球

涂覆的 RAM 选用某铁氧体材料,其介电常数与磁导率分别为 $\epsilon_r = (11.4, 1.52)$, $\mu_r = (1.27, 2.2)$ 。涂覆层的厚度 $d = 5$ mm。入射波频率为 1.5 GHz,电尺寸 $ka = 10\pi$,用高频方法计算其双站 RCS 分布与参考值^[14]的对比如图 3 所示。可以看出,对于电大尺寸目标,计算值与参考值吻合较好,高频方法具有较好的精度。

2.2 表面涂覆 RAM 的平直桨叶

涂覆的 RAM 为各向同性介质,介电常数为 $\epsilon_r = (12.75, 0.145)$,磁导率为 $\mu_r = (1.49, 1.09)$,涂层厚度为 $d = 3$ mm。图 4 为高频方法计算结果与参考值的对比。可以看出,对于三维复杂形状的目标,高频方法在高频区的计算结果与参考值^[15]吻合较好,拥有较高的精度。

3 共轴旋翼高速直升机 RCS 特性及 RAM 的影响

以 X-2 直升机为参考,表 1 给出了其外形尺寸的参数。相应的几何模型通过 CAD 软件建立,分别对共轴双旋翼和机身进行研究分析。

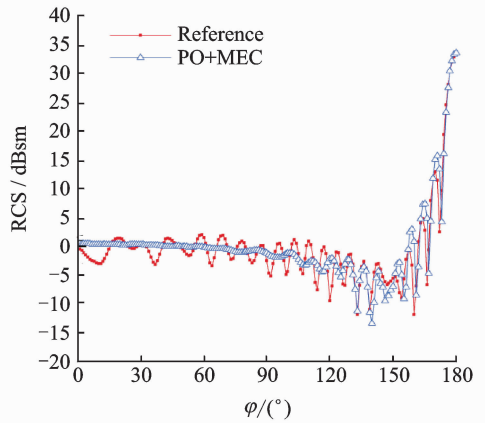


图 3 高频方法计算涂覆金属球双站 RCS 结果
Fig. 3 Bistatic RCS of coated metal ball by high frequency method

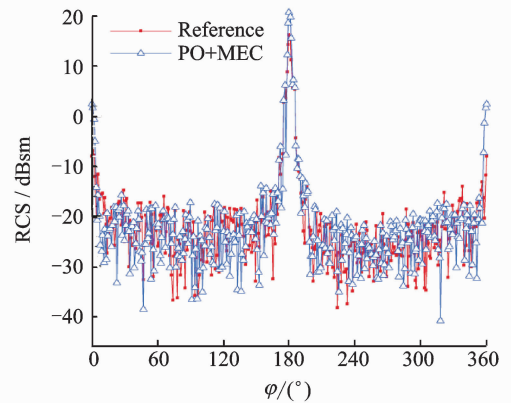


图 4 高频方法计算涂覆单片桨叶双站 RCS 结果
Fig. 4 Bistatic RCS of coated separate blade by high frequency method

表 1 X-2 直升机外形参数

Tab. 1 Dimension parameters about X-2 helicopter

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|----------|------|--------|-------|
| 机长/m | 8.28 | 机高/m | 2.59 |
| 机宽/m | 2.09 | 桨叶片数 | 4片×2副 |
| 尾螺旋桨直径/m | 1.66 | 旋翼直径/m | 7.43 |

3.1 涂覆 RAM 对双旋翼 RCS 特性的影响

雷达波选取 10 GHz 正弦波,从 0° 位置入射,接收器从 0° 旋转至 360° 。图 5 为共轴双旋翼坐标系示意图。

图 6 给出了入射波频率为 10 GHz 时,无桨毂整流罩和有桨毂整流罩的共轴双旋翼 RCS 分布。从图中可以看出,在 $0^\circ, 180^\circ, 90^\circ, 270^\circ$ 方位,即桨叶所在方位,有无桨毂对 RCS 值几乎没有影响。但是除了桨尖所在的方位,有桨毂的情况下其他角度上的 RCS 都比无桨毂情况提高了 10 ~ 20 dBsm,说明桨毂及其整流罩对旋翼整体 RCS 贡献是非常显著的,该部位是双旋翼的一个强散射

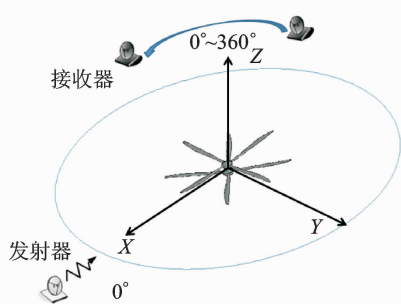


图 5 雷达波水平面内照射共轴旋翼示意图

Fig. 5 Coaxial rotor under radar illumination in horizontal

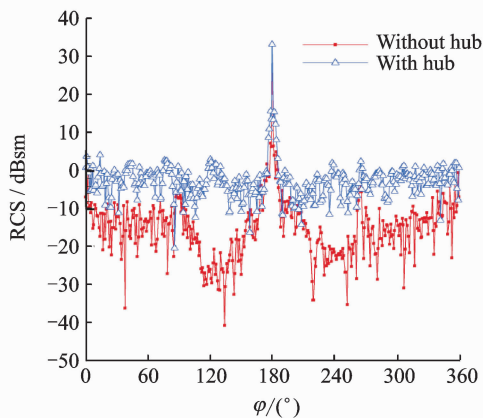


图 6 含桨毂双旋翼与无桨毂双旋翼 RCS 对比

Fig. 6 Contrast of RCS distribution of coaxial rotor with and without hub

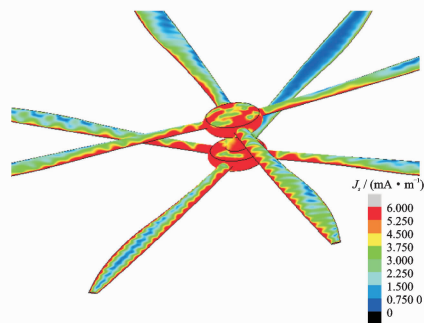
部位。在接下来的研究分析中可以考虑将桨毂及其整流罩作为涂覆 RAM 重点考虑的部位。

图 7 为涂覆前后的旋翼表面电流云图分布。从图中可以看出,各片桨叶边缘的感应电流有明显减弱,电流强度有 $0.8 \sim 1.5 \text{ mA/m}$ 的减小;桨毂整流罩处的表面电流强度有 $1.5 \sim 3 \text{ mA/m}$ 的减小。这表明涂覆 RAM 后对表面行波和边缘绕射波吸收效果显著,对桨毂和桨叶边缘这些强散射部位的雷达散射特性有明显的抑制作用。

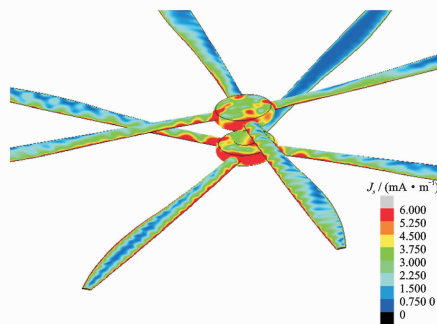
图 8 给出了全金属 PEC、全涂覆 RAM 和只有桨毂及其整流罩涂覆 RAM 三种情形的 X-2 共轴旋翼的双站 RCS 分布。从图中可以看出,全涂覆方案的双站 RCS 均值与部分涂覆方案几乎相同,这样小的 RCS 缩减量几乎可以忽略。因此,对于 X-2 直升机的共轴旋翼,只在桨毂处涂覆 RAM 的部分涂覆方案也能够达到不亚于全涂覆的隐身性能提升效果。

3.2 机身结构布局对 RCS 的影响

与共轴旋翼的分析方法类似,仍然选用 10.0 GHz 的正弦波分别从鼻锥 (0°)、侧向 (90°) 和尾追 (180°) 3 个典型方位照射含有平垂尾与尾螺



(a) Before



(b) After

图 7 涂覆 RAM 前后的表面电流密度分布对比

Fig. 7 Contrast of surface current density distribution of coaxial rotor before and after coated with RAM

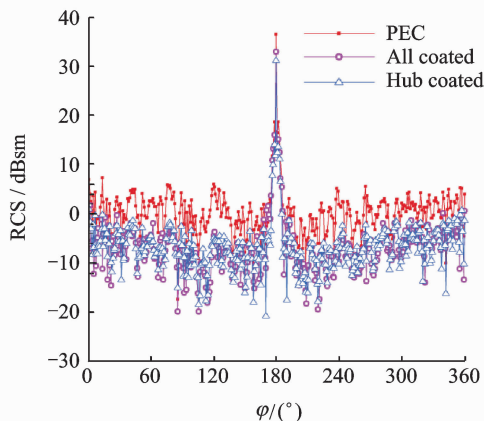


图 8 涂覆 RAM 前后的 RCS 分布对比

Fig. 8 Contrast of RCS distribution of coaxial rotor before and after being coated with RAM

旋桨的机身模型,雷达接收天线由 0° 方位转动至 360° 方位,双站角变化步长取 1° 。图 9 为雷达波水平面内照射机身的双站模型示意图。

图 10 给出了在机身强散射部位局部涂覆 RAM 前后表面电流云图的比较。可以看出,在涂覆 RAM 之前,雷达波从 0° 、 90° 和 180° 入射时,机身头部两侧和尾部两侧、平垂尾和尾部螺旋桨的边缘均产生了较强的表面电流,而侧表面电流相对较弱,机身顶部和底部的电流最弱。雷达波从 90° 方向入射时,平尾侧端面、垂尾和机身侧面产生了最强的表面电流。这表明平垂尾和尾部螺旋桨等翼

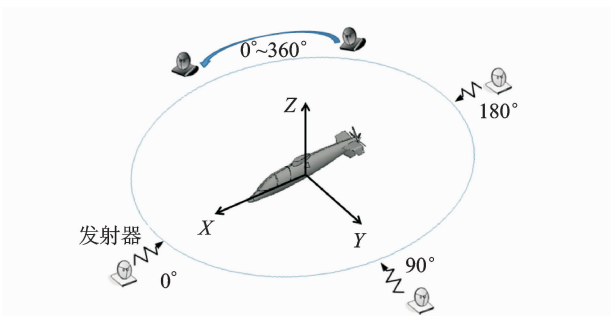


图9 雷达波水平面内照射机身的双站模型示意图

Fig. 9 Helicopter fuselage under radar illumination in horizontal

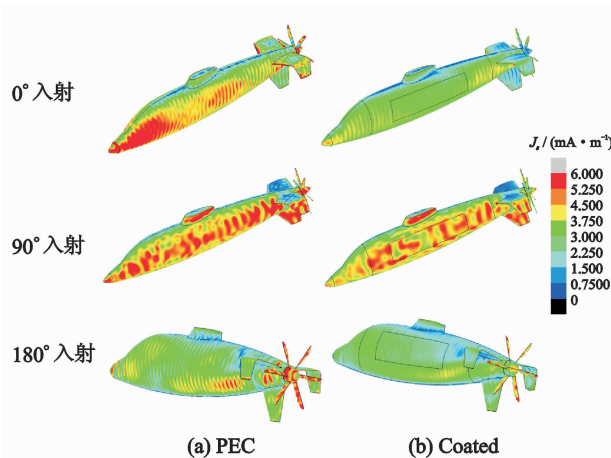
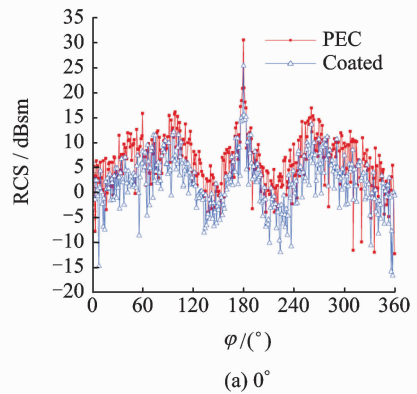


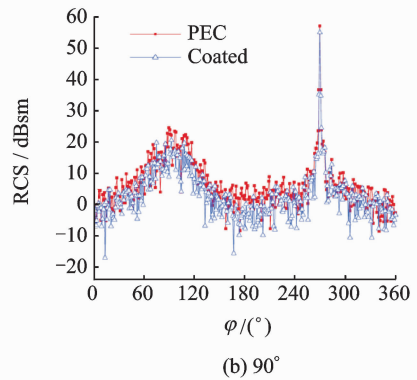
图10 机身局部涂覆RAM前后表面电流密度分布对比
Fig. 10 Contrast of surface current density distribution of fuselage before and after being coated with RAM

面部件、机身上曲率较大的机头电子设备舱、驾驶舱前部所在的鼻锥部位与尾梁后段尾部、曲率较小的机身侧面护板和尾梁前段都是机身的重要强散射部位。在涂覆了RAM之后,雷达波从 0° 和 180° 入射时,机头鼻锥、机身侧面护板和尾梁、平垂尾边缘和尾部螺旋桨等部位的表面电流有明显的减小,达到约 $0.8\sim 3\text{ mA/m}$ 。而从 90° 入射时,机身侧面、平尾端板和垂尾处的表面电流仅略有减小,约为 0.8 mA/m ,说明雷达吸波材料对机身的隐身性能提升是显著的。

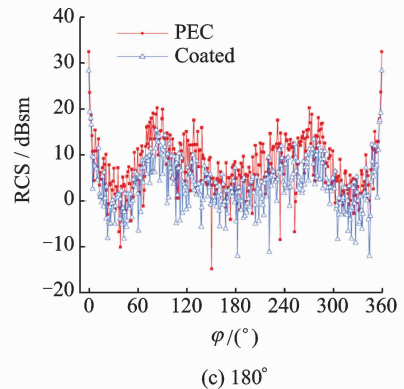
图11给出了在机身强散射部位局部涂覆RAM前后的双站RCS分布对比。可以看出,涂覆RAM后,从3个方位照射时,其RCS均值分别减少了约4,2和4 dBsm。说明雷达波侧面照射时,机身侧面的曲率较小的大面积护板主要产生镜面散射,而鼻锥和尾追方位照射时,曲率较大的头尾部和其他部件主要产生边缘绕射和爬行波,在垂直于机身表面的镜面反射情况下吸收率较小,涂覆RAM吸收效果不是十分显著,而对边缘绕射波和爬行波吸收效果较好。



(a) 0°



(b) 90°



(c) 180°

图11 机身局部涂覆RAM前后RCS分布对比

Fig. 11 Contrast of RCS distribution of coaxial rotor before and after being coated on fuselage partly with different incident angles

4 结 论

本文结合PO方法和MEC方法,对共轴刚性双旋翼高速直升机的旋翼和机身的RCS特性进行了计算和分析,并研究了涂覆RAM后的隐身性能提升效果,获得了以下结论:

(1)共轴双旋翼桨毂及其整流罩对共轴旋翼整体RCS贡献非常显著,该部位是共轴旋翼的一个强散射部位。

(2)共轴旋翼表面全涂覆RAM后对桨毂和桨叶边缘这些强散射部位RCS抑制效果明显。只在桨毂及其整流罩部位涂覆RAM的设计方案也能够显著降低旋翼整体的RCS,其隐身性能提升效果不亚于全涂覆方案。因此,在尽量不影响共轴旋

翼其他性能的前提下,部分涂覆 RAM 的方案更有优势。

(3)机身整体的 RCS 明显大于旋翼的 RCS。机身上曲率较大的鼻锥和尾部以及曲率较小的侧面板是机身的重要强散射部位。平垂尾和尾部螺旋桨两个翼面部件的加入明显增加了机身全方位的 RCS,这两个部件也是强散射源,在涂覆 RAM 的隐身设计中需要着重考虑。

(4)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。

参考文献:

- [1] 吴希明. 高速直升机发展现状、趋势与对策[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(2):173-179.
WU Ximing. Development status, trend and countermeasure of high speed helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(2):173-179.
- [2] HEIKELL J. Helicopters on the asymmetric battlefield: Challenges for photonics[J]. Proc Spie, 2007; 67380M-67380M-13.
- [3] JENN D C. Radar and laser cross section engineering second edition [M]. Philadelphia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.
- [4] RIUS J M, FERRANDO M, JOFRE L. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time[J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions, 1993, 41(9):1308-1319.
- [5] JOHNSENT, OLSEN K E, GUNDERSEN R. Hovering helicopter measured by bi-multistatic CW radar [C]// 2003 IEEE Radar Conference. [S.l.]: IEEE, 2003; 165-170.
- [6] POULIGUEN P, DAMIENS J F, MOULINET R. Radar signatures of helicopter rotors in great bistatism[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2003; 536-539.
- [7] MISIUREWICZ J, KULPA K, CZEKALA Z. Analysis of radar echo from a helicopter rotor hub[C]// 12th International Conference on Microwaves and Radar. [S.l.]: IEEE, 1998; 866-870.
- [8] CLEMENTE C, SORAGHAN J J. GNSS-based passive bistatic radar for micro-Doppler analysis of helicopter rotor blades[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(1): 491-500.
- [9] 马东立, 武哲. 飞机翼面类部件的雷达散射截面计算[J]. 系统工程与电子技术, 1994(6):33-40.
MA Dongli, WU Zhe. Radar cross section calculation of aircraft airfoil parts [J]. Systems Engineering and Electronics, 1994(6):33-40.
- [10] 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 of radar target characteristics of helicopter airfoil parts [J]. Journal of Aeronautical Dynamics, 2016, 31(11):2691-2700.
- [11] 刘军辉, 张云飞. 直升机旋翼涂敷吸波材料减缩 RCS 试验研究[J]. 飞机设计, 2011, 31(5):5-8.
LIU Junhui, ZHANG Yunfei. Study on reducing RCS of helicopter rotor absorbing material [J]. Aircraft Design, 2011, 31(5):5-8.
- [12] YOUSSEF N N. Radar cross section of complex targets[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(5): 722-734.
- [13] PATHAK P H. Uniform geometrical theory of diffraction [J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1987, 358(6):47-61.
- [14] SONG J M, CHEW W C. Fast multipole method solution using parametric geometry[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1994, 7(16): 760-765.
- [15] GRANDE O, CAÑIZO J, ANGULO I, et al. Simplified formulae for the estimation of offshore wind turbines clutter on marine radars[J]. Scientific World Journal, 2013, 2014(1):95-104.

