

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.02.010

基于 CEM 方法的直升机 RCS 计算及参数分析

孟 晨 招启军 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方法(Computational electromagnetics method,CEM),并开展了结构参数对雷达散射截面(Radar cross section,RCS)特性影响的研究。以微分形式的 Maxwell 方程作为电磁特性求解的控制方程,电磁计算网格采用 Yee 元胞的技术生成,对控制方程进行时间和空间的中心差分格式离散。应用完全匹配层(Perfect matching layer,PML)技术作为吸收边界条件,并与基于等效原理的近远场外推法相结合,建立了直升机 RCS 的高精度数值方法。分别采用二维无限长导体圆柱和三维金属立方体作为验证算例,结果表明 CEM 方法比高频方法具有明显的高精度特点。在此基础上,研究翼型厚度、弯度、桨叶片数对旋翼雷达散射特征的影响机理和变化规律,同时计算机身不同结构布局参数下的 RCS 特性,分析短翼和平尾对机身强散射特征的影响规律。研究表明:桨尖是旋翼的重要散射源之一,采用薄翼型桨叶能有效改善旋翼的雷达散射性能,短翼和平尾会在不同角域内增加机身的雷达散射截面,在直升机隐身设计中需要重点考虑。

关键词:直升机;翼型;旋翼;计算电磁学方法(CEM);雷达散射截面(RCS);结构参数

中图分类号:V218 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)02-0243-09

Helicopter RCS Calculation and Parameter Analysis Based on CEM Method

Meng Chen, Zhao Qijun, Jiang Xiangwen

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

Abstract: In order to increase the prediction accuracy on helicopter radar scattering characteristics, the computational electromagnetics method (CEM) is established to analyze radar scattering characteristics, and the influence of structure parameters on radar cross section (RCS) characteristics is studied. The differential forms of Maxwell's equations are taken as the governing equations for solving electromagnetic property, computational electromagnetic grids are generated by adopting the Yee grid technology, and the governing equations are solved by temporal and spatial discretization with central difference scheme. The perfect matching layer (PML) technique is employed as the absorbing boundary conditions, and the numerical method with high precision for helicopter RCS is established by combined with the equivalence principle of near-far field extrapolation. Two-dimensional conductor cylinder with infinite length and three-dimensional metal cube are taken as numerical examples respectively. The results show that CEM has higher precision than the high frequency method obviously. On this basis, researches on the influence mechanism and variation characters of airfoil thickness, airfoil camber and the number of blades on rotor radar scattering characteristics are carried out, and RCS characteristics of fuselage with different structure parameters are computed, then the influence mechanism of short wings and horizontal tails on

收稿日期:2015-01-15;修订日期:2015-02-15

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

fuselage strong scattering characteristics is analyzed. It is demonstrated that blade tip is one of the significant scattering sources of rotor, rotor with thin airfoil can improve the radar scattering performance effectively, and short wings and horizontal tails can increase the RCS of fuselage in different angles, which should be taken into key consideration in stealth design of helicopter.

Key words: helicopter; airfoil; rotor; computational electromagnetic method (CEM); radar cross section (RCS); structure parameters

近年来随着雷达探测技术的飞速发展,武装直升机的作战环境变得愈加恶劣,从而对其雷达隐身性能的要求不断提高。雷达隐身技术包括外形、吸波材料、电子对抗和等离子体等^[1],其中,最有效的措施是外形隐身技术,而外形隐身技术的关键是目标雷达散射截面(Radar cross section, RCS)的准确预估^[2]。因此,通过开展对直升机 RCS 高精度计算方法和雷达目标特性的研究,发现和分析强散射特征的影响参数,对降低直升机被发现的概率,增强战场生存力有着重要的实际意义和学术价值^[3]。

RCS 预估方法按照求解方式分为经典电磁学方法和计算电磁学方法(Computational electromagnetic method, CEM)^[4]。经典电磁学理论是将所有的宏观电磁问题归结为 Maxwell 方程组在各个边界下的求解问题,通过求得问题的精确解或近似解来获得 RCS,但解析解的方程只有在部分坐标系中才能分离变量,适用范围小,同时近似解方法对复杂目标难以捕捉细节特征,所以经典电磁学在计算复杂外形目标时局限性较大;而 CEM^[5]相比经典电磁学方法在解决电磁学问题时受边界约束大为减少,可以解决各种类型的复杂问题,且拥有相对较高的精度,能很好地弥补经典电磁学在计算复杂物体时受限这一不足。因而,基于 CEM 方法的直升机雷达目标特性预估方法的发展成为当前直升机技术的一个研究热点。

由于各国对武装直升机隐身性能研究的保密,国外公开发表的相关文章较少。文献[6,7]中首次提出基于时域有限差分法(Finite-difference time-domain, FDTD)的 CEM 方法,该方法对模拟复杂模型的电磁问题有独特的性能和优点,可以给出电磁场随时间的演化过程和物理变化过程,方便对问题的实时分析,为目标 RCS 预估提供了理论基础;1995年,Andrew^[8]等人应用 CEM 法对加装在阿帕奇直升机尾梁上的高频天线的辐射特性进行了计算,研究了电磁波频率变化对直升机电磁环境的影响;随后,Georgakopoulos^[9]等人结合 CEM 方法研究了多个天线在直升机旋翼和机身之间的耦合作用和影响;Hikage^[10]等人在 2011 年用该方法

对飞机机舱的电磁场分布进行了模拟;Am-burgey^[11]等人在 2012 年研究了碳纤维增强聚合物复合材料对飞行器天线的性能影响。国内葛德彪^[12]等人给出了比较系统的 CEM 方法构建过程;陈晋吉^[13]等人研究了基于 FDTD/MTL 混合算法求解飞行器线束电磁敏感度的方法;关珊珊^[14]通过 GPU 加速和 CEM 方法对直升机瞬变电磁响应进行分析;聂亮^[15]等人在 2014 年对超声速飞行器绕流流场电磁散射特性分析,获得了一些有意义的结果。综合国内外的情况,大多研究集中在天线或材料等电磁环境影响或固定翼飞行器的隐身能力评估领域,采用 CEM 方法直接开展直升机 RCS 的计算和参数分析的研究并不多见。

鉴于此,本文针对直升机几何外形和雷达散射特征的复杂性,旨在控制和减缩直升机机身和旋翼的 RCS 特性,从电磁网格生成技术、Maxwell 方程的时间与空间离散格式、边界条件等入手,建立一套基于 CEM 方法的直升机 RCS 预估的方法,开展直升机雷达散射性能的分析并研究结构参数变化对其 RCS 特性的影响,拟获得一些减缩直升机 RCS 的设计结论。

1 数值计算方法

1.1 Maxwell 方程组及其微分形式

Maxwell 方程组包含 4 个方程,分别是法拉第电磁感应定律、安培定理、电场的高斯定理和磁场的高斯定理,其微分形式分别为

$$\text{法拉第电磁感应定律} \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = -\mathbf{J}_m \quad (1)$$

$$\text{安培定理} \quad \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \nabla \times \mathbf{H} = -\mathbf{J} \quad (2)$$

$$\text{电场的高斯定理} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\text{磁场的高斯定理} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

式中: \mathbf{B} 为磁感应强度或磁通密度(Wb/m^2); \mathbf{D} 为电位移矢量或电通密度(C/m^2); \mathbf{H} 为磁场强度(A/m); \mathbf{E} 为电场强度(V/m); \mathbf{J} 为自由电流密度(A/m^2); \mathbf{J}_m 为自由磁流密度(V/m^2); ρ 为自由电荷密度(C/m^3)。

各向同性线性介质中的本构关系为

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \\ \mathbf{J}_m = \sigma_m \mathbf{H} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϵ 为介质介电常数(F/m); μ 为磁导系数(H/m); σ 为电导率(S/m); σ_m 为磁导率(Ω /m)。真空中 $\sigma = \sigma_m = 0$, $\epsilon = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

Maxwell 方程组中的式(1,2)在直角坐标系的微分表示形式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

以及

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} - \sigma_m H_z \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

1.2 空间离散及 Yee 元胞

将式(6,7)进行时域有限差分离散,令 $f(x, y, z, t)$ 代表 E 或 H 中的某一分量,在时间和空间中的离散采用以下符号表示

$$f(x, y, z, t) = f(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = f^n(i, j, k) \quad (8)$$

对 $f(x, y, z, t)$ 关于时间和空间的一阶偏导数取中心差分近似,就可以得到 \mathbf{E} 或 \mathbf{H} 在直角坐标系中的某一分量,分解到 Yee 元胞单元如图 1 所示。在 Yee 元胞中,每一个磁场(或电场)分量由 4 个电场(或磁场)分量环绕。这种电磁场分量的空间离散方式不仅符合电磁感应定律和安培环路定律的物理法则,而且相对位置也适合 FDTD 差分计算,能够准确描述电磁波传播特性。同时,电场和磁场在时间顺序上交替求解,间隔相差半个时间步长,使 Maxwell 方程经 FDTD 离散后呈显式差分形式,从而在时间上迭代求解时,不需要逆矩阵运算。

将得到电场和磁场中各分量空间节点与时间步取值离散到 Yee 元胞单元中得到各节点位置:电场节点中, E_x 在 Yee 元胞单元坐标中节点号为 $(i+1/2, j, k)$, E_y 为 $(i, j+1/2, k)$, E_z 为 $(i, j, k+1/2)$;相应 H_x 在坐标中的节点号为 $(i, j+1/2, k+1/2)$, H_y 为 $(i+1/2, j, k+1/2)$, H_z 为 $(i+1/2, j+1/2, k)$ 。

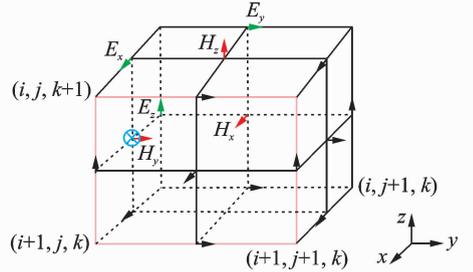


图 1 Yee 元胞单元示意图

Fig. 1 Schematic of Yee grid cell

$2, j+1/2, k)$ 。时间节点交替求解,设电场求解为 n ,则磁场求解就为 $n+1/2$ 。

1.3 边界条件

在入射波加入时需要设定远场边界条件,表现为总场边界条件设定以及吸收边界条件设定。

总场边界条件应用等效原理在区域界面内设置等效电磁流来模拟电场和磁场的变化;而吸收边界条件采用完全匹配层(Perfect matching layer, PML)技术,即通过在计算区域截断边界处设置一种特殊介质层与相邻介质波阻抗完全匹配,使入射波无反射地穿过两种介质的分界面而进入 PML 并且迅速衰减,达到吸收作用。

在三维 PML 介质中,每个场分量分解为两个子分量,则 PML 介质中波方程为

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon \frac{\partial E_{xy}}{\partial t} + \sigma_y E_{xy} &= \frac{\partial (H_{zx} + H_{zy})}{\partial y}, \\ \mu \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} + \sigma_{my} H_{xy} &= -\frac{\partial (E_{zx} + E_{zy})}{\partial y}, \\ \epsilon \frac{\partial E_{xz}}{\partial t} + \sigma_z E_{xz} &= \frac{\partial (H_{xy} + H_{yz})}{\partial x}, \\ \mu \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} + \sigma_{mz} H_{xz} &= -\frac{\partial (E_{yx} + E_{yx})}{\partial z}, \\ \epsilon \frac{\partial E_{yz}}{\partial t} + \sigma_z E_{yz} &= \frac{\partial (H_{zx} + H_{zy})}{\partial y}, \\ \mu \frac{\partial H_{yz}}{\partial t} + \sigma_{mz} H_{yz} &= -\frac{\partial (E_{xy} + E_{xz})}{\partial z}, \\ \epsilon \frac{\partial E_{yx}}{\partial t} + \sigma_x E_{yx} &= \frac{\partial (H_{zx} + H_{zy})}{\partial y}, \\ \mu \frac{\partial H_{yx}}{\partial t} + \sigma_{mx} H_{yx} &= -\frac{\partial (E_{zx} + E_{zy})}{\partial x}, \\ \epsilon \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} &= \frac{\partial (H_{xy} + H_{yz})}{\partial x}, \\ \mu \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_{mx} H_{zx} &= -\frac{\partial (E_{yz} + E_{yx})}{\partial x}, \\ \epsilon \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} &= \frac{\partial (H_{zx} + H_{zy})}{\partial y}, \\ \mu \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_{my} H_{zy} &= -\frac{\partial (E_{xy} + E_{xz})}{\partial y} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{mx}, \sigma_{my}, \sigma_{mz}$ 为电导率和磁导率。

三维 CEM 方法中应用 PML 吸收层的各节点要进行迭代计算, 并且同一节点要分裂成两个子分量计算, 占用一定的计算空间, 所以通常 PML 厚度为 3~9 层, 本文中的计算均取厚度为 7 层。

1.4 目标 RCS 计算方法

1.4.1 近场-远场外推

对于时谐场情况, 在均匀介质中电流与磁流的 Maxwell 方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} - \mathbf{J}_m \\ \nabla \times \mathbf{H} = -j\omega\epsilon\mathbf{E} + \mathbf{J} \end{cases} \quad (10)$$

电流与磁流的辐射场为

$$\begin{cases} \mathbf{E} = -\nabla \times \mathbf{F} - j\omega\mu\mathbf{A} + \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) \\ \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} - j\omega\mu\mathbf{F} + \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dV' \\ \mathbf{F}(\mathbf{r}) = \int \mathbf{J}_m(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dV' \end{cases} \quad (12)$$

式中: \mathbf{A} 和 \mathbf{F} 为矢量势函数; $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为自由空间格林函数; \mathbf{r}, \mathbf{r}' 分别为观察点和源点位置矢, 取远区近似

$$|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \approx r - \mathbf{r}' \cdot \mathbf{e}_r \quad (13)$$

式中: \mathbf{e}_r 为 \mathbf{r} 方向单位矢量。

设观察方向为 φ, θ , 则散射波矢量 \mathbf{k}

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}' = kx' \sin\theta \cos\varphi + ky' \sin\theta \sin\varphi + kz' \cos\theta \quad (14)$$

式中: k 为波数。

由电流矩和磁流矩可以得到三维远区电场的计算公式为

$$\begin{cases} E_\theta = -jk \frac{\exp(-jkr)}{4\pi r} [Z(f_x \cos\theta \cos\varphi + f_y \cos\theta \sin\varphi - f_z \sin\theta) + (-f_{mx} \sin\varphi + f_{my} \cos\varphi)] \\ E_\varphi = jk \frac{\exp(-jkr)}{4\pi r} [Z(f_x \sin\varphi - f_y \cos\varphi) + (f_{mx} \cos\theta \cos\varphi + f_{my} \cos\theta \sin\varphi - f_{mz} \sin\theta)] \end{cases} \quad (15)$$

1.4.2 目标 RCS 计算

RCS 是表征物体散射电磁波能力大小的一种度量, 是在给定方向上散射功率入射场功率密度归一化^[16-17], 其定义式为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{H}^s|^2}{|\mathbf{H}^i|^2} \quad (16)$$

式中: σ 为雷达散射截面; R 为目标到雷达天线的距离; $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$ 分别为远场电/磁场频域值; $\mathbf{E}^i, \mathbf{H}^i$ 分别表示入射波在目标处的电/磁场频域值。

1.5 CEM 方法计算流程

根据本章 CEM 方法的基本原理, 图 2 给出了文中建立的直升机雷达目标特性求解流程图:

(1) 前处理模块: 确定旋翼的结构参数和机身布局参数, 建立对应的 CAD 模型, 转换成计算中使用的 Yee 元胞单元, 最后读入网格信息;

(2) 求解器模块: 首先进行计算域初始化, 包括电磁场 $\mathbf{E}, \mathbf{H}=0$, 时间步 $n=0$, 电磁介质参数、入射波角度和极化方向等的设定, 然后开始时间循环, 确定总场和吸收边界条件, 随后求解各单元的电磁场分量, 获得等效电磁流, 最后通过推进步数和残值约束, 判断是否满足结束条件;

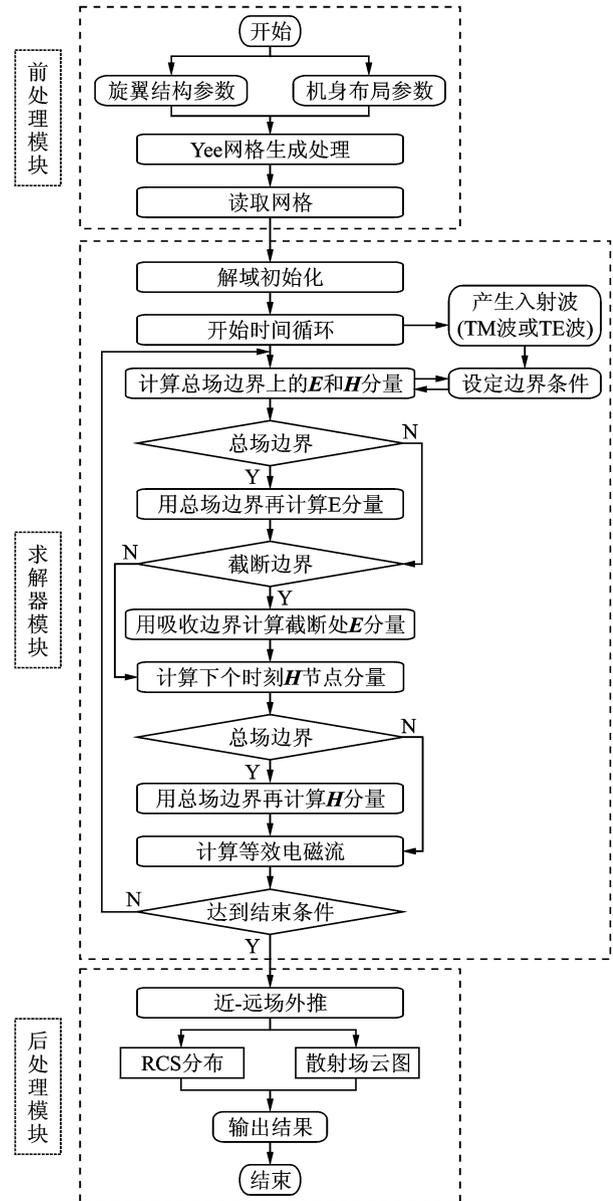


图 2 直升机雷达目标特性求解流程

Fig. 2 Flow chart about solutions of helicopter radar scattering characteristic

(3)后处理模块:对获得的等效电磁流进行近远场外推,计算雷达波入射平面内接收器 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的 361 个方位角的双站 RCS 分布和散射场云图,开展旋翼结构参数和机身布局参数对 RCS 特性的影响分析。

2 算例验证

2.1 二维无限长导体圆柱电磁散射数值模拟

为了验证文中方法在二维空间下的有效性,选择无限长导电圆柱模型进行模拟仿真,并与其解析解进行对比。图 3 给出了 TM 波入射电尺寸 $ka=2$ 时圆柱的示意图,图 4 给出其 RCS 计算值与解析值随双站角 ϕ 变化的结果,并且为了方便比较,对结果进行归一化。可以看出计算值与理论值^[14]吻合较好,说明文中方法适合二维目标的 RCS 计算。

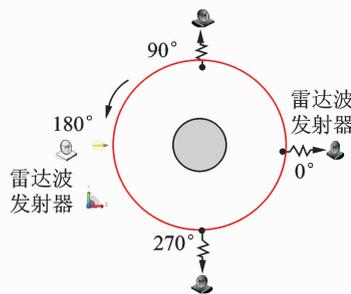


图 3 圆柱(TM)入射示意图($ka=2$)

Fig. 3 Schematic of radar wave(TM) incidence on cylinder ($ka=2$)

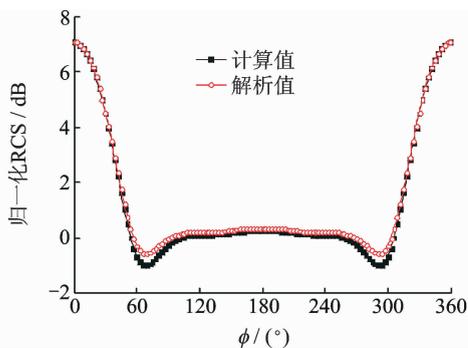


图 4 双站 RCS 计算值与解析值比较($ka=2$)

Fig. 4 Comparison of bistatic RCS between computation and theory values ($ka=2$)

2.2 三维金属立方体电磁散射数值模拟

为了验证文中方法计算三维空间目标 RCS 特性的有效性,选用有实验结果可供对比的金属正方体双站模型进行计算分析。正方体的边长为

1.5 m,入射波为正弦波,波长 $\lambda=1$ m, Yee 元胞单元大小 $\delta=14.3$ mm。图 5 给出了金属立方体双站 RCS 计算与实验值比较,可以看出文中 CEM 方法的计算结果与实验值^[18]比较吻合较好,而与基于物理光学法(Physical optics, PO)的计算结果^[19]吻合相对较差,表明文中方法对目标 RCS 的仿真有效,可以用来计算直升机的雷达隐身性能,并且相比高频方法有较高的精度。

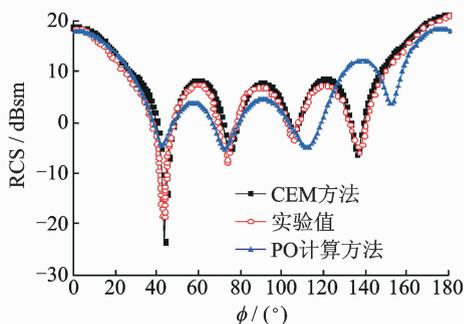


图 5 双站 RCS 计算与实验值比较

Fig. 5 Comparison of bistatic RCS between computation and experimental data

3 旋翼结构参数变化对 RCS 的影响

3.1 翼型参数对旋翼 RCS 的影响

3.1.1 翼型厚度的影响

为了研究翼型厚度对桨叶 RCS 的影响,分别对翼型为 NACA0006、NACA0012、NACA0018 和 NACA0024 的桨叶 RCS 特性进行模拟,网格尺寸 $\delta=3.5$ mm,入射波从桨叶前缘照射,频率为 6 GHz。图 6 给出了不同厚度翼型的桨叶双站 RCS 分布。可以看出:厚翼型桨叶的 RCS 较薄翼型桨叶增幅明显,这是因为厚翼型桨叶的前缘产生的镜面散射较强。

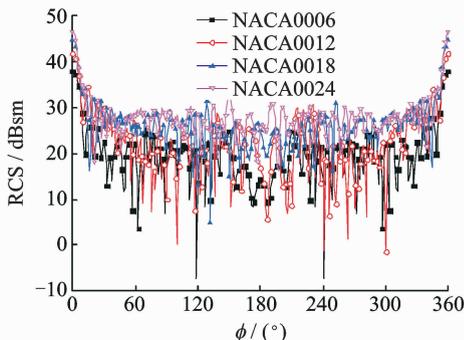


图 6 不同厚度翼型桨叶 RCS 响应特性

Fig. 6 RCS responses of blades with different thicknesses

根据雷达最大探测作用距离方程的公式^[20]

$$R = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{\min}} \right]^{1/4} \quad (17)$$

式中: G 为天线增益; P_t 为平均发射功率; P_{\min} 为最小接收机可检测功率; λ 为波长。

可知在相同条件下, 雷达探测的最大作用距离与旋翼 RCS 的四次方根成正比, 以 NACA0024 翼型作为参考, 其他翼型桨叶的 RCS 峰值 σ_{peak} 和均值 σ_{mean} 如表 1 所示。 R_d 为对应翼型最大探测距离, R_{max} 为 4 种翼型中最大的最大探测距离。其中, NACA0006 翼型的桨叶雷达探测距离 (依据 RCS 峰值和均值) 分别是 NACA0024 的 61.52% 和 62.12%。所以, 选取厚度较小的翼型设计桨叶, 雷达综合隐身效果比较好。

表 1 不同翼型厚度桨叶的 RCS 峰值和均值

Tab. 1 RCS peak and mean values of blades with different thicknesses

翼型	$\sigma_{\text{peak}} /$	$R_d / R_{\text{max}} /$	$\sigma_{\text{mean}} /$	$R_d / R_{\text{max}} /$
	dBsm	%		dBsm
NACA0006	37.77	61.52	19.54	62.12
NACA0012	41.60	76.69	22.08	71.90
NACA0018	44.49	90.57	26.04	90.31
NACA0024	46.21	100	27.81	100

3.1.2 翼型弯度的影响

为了研究翼型弯度对桨叶 RCS 的影响, 分别采用 NACA0012、NACA2412、NACA4412 和 NACA6412 翼型的单片桨叶进行仿真模拟, 元胞单元大小 $\delta = 5 \text{ mm}$, 入射波从桨叶前缘照射, 入射频率为 3 GHz。图 7 给出了不同厚度翼型的桨叶双站 RCS 响应特性的分布。可以看出: 随着桨叶翼型弯度的增大, 翼型上表面凸出愈发明显, 所以桨叶的 RCS 峰值和均值都呈递增的趋势在增大。

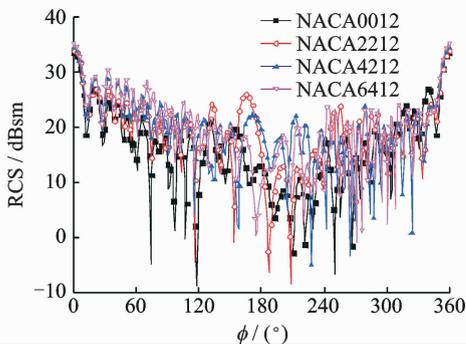


图 7 不同弯度桨叶 RCS 响应特性

Fig. 7 RCS responses of blades with different cambers

以 NACA6412 翼型作为参考, 其他不同翼型弯度桨叶的 RCS 峰值和均值如表 2 所示。其中, NACA0012 翼型的桨叶 RCS 峰值和均值对应的雷达探测距离分别是 NACA6412 的 91.52% 和 79.93%。所以选取弯度较小的翼型设计桨叶, 雷达综合散射水平会得到降低。

表 2 不同翼型弯度桨叶的 RCS 峰值和均值

Tab. 2 RCS peak and mean values of blades with different cambers

翼型	$\sigma_{\text{peak}} /$	$R_d / R_{\text{max}} /$	$\sigma_{\text{mean}} /$	$R_d / R_{\text{max}} /$
	dBsm	%		dBsm
NACA0012	33.56	91.52	15.78	79.93
NACA2412	33.92	93.43	18.62	94.13
NACA4412	34.33	95.66	19.20	97.33
NACA6412	35.10	100	19.67	100

3.2 桨叶片数对旋翼 RCS 的影响

为了研究桨叶片数对旋翼 RCS 响应特性的影响, 分别选取 2, 3, 4 和 5 片桨叶的旋翼进行双站 RCS 的计算, 雷达波从 180° 位置入射, 接收器从 0° 旋转至 360° 。图 8 为雷达波照射 4 片桨叶旋翼的示意图。

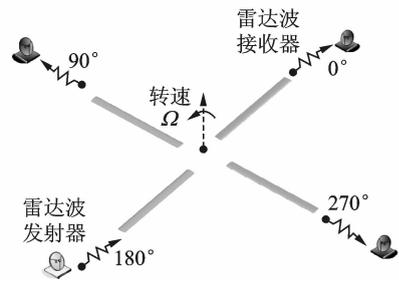


图 8 雷达波照射 4 片桨叶的旋翼示意图

Fig. 8 Schematic of radar wave incidence on rotor with four blades

图 9, 10 分别给出了不同片数桨叶的旋翼 RCS 分布和散射场云图。可以看出:

图 9(a) 的 0° 与 180° , 图 9(b) 的 60° , 180° 和 300° , 图 9(c) 的 0° 与 180° 和图 9(d) 的 36° , 108° , 180° , 252° 以及 324° 散射方位角出现 RCS 极大值, 这些 RCS 极大值的方位角对应不同桨叶的桨尖部位, 可见桨尖是旋翼重要的强散射源之一。

4 机身结构布局参数对 RCS 的影响

本文选用 0.25, 1.0, 和 2.5 GHz 三种频率的正弦雷达波分别从鼻锥、侧向和尾追方位照射孤立

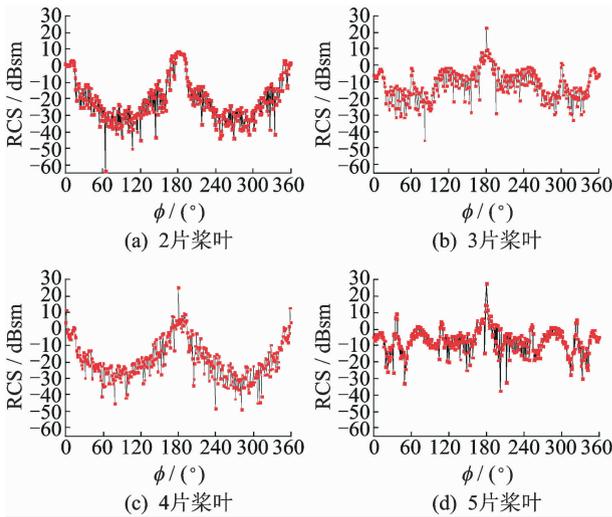


图 9 不同桨叶片数旋翼的 RCS 分布

Fig. 9 RCS distributions of rotor with different blades

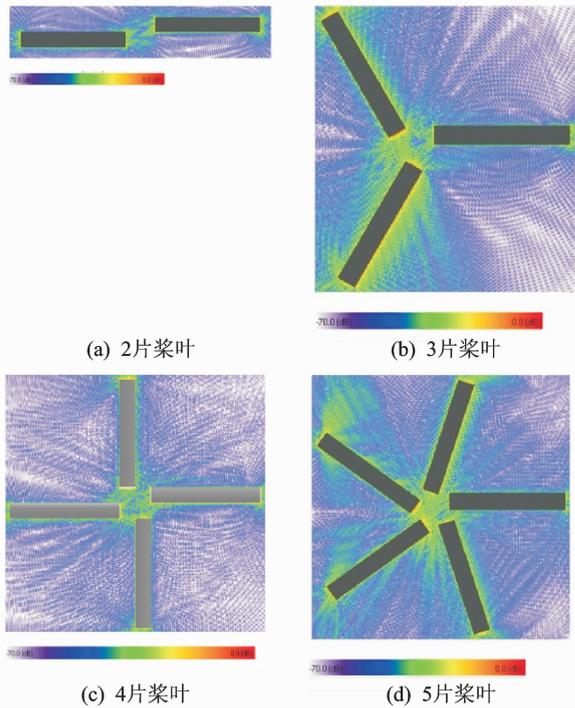


图 10 不同片数桨叶旋翼的散射场云图

Fig. 10 Contour of scattering field of rotor with different blades

机身模型 (M1) 和添加平尾、短翼的机身模型 (M2), 图 11 给出了雷达波前向照射这两种模型的示意图, 图 12~14 给出了两种模型在不同频率电磁波照射下, 前向、侧向和后向的 RCS 分布。

从图 12(a)中可以看出, 随着雷达波入射频率的增加, RCS 的峰值和均值都呈明显的增大, 0.25 GHz 时尾追处的峰值为 18.16 dBsm, 1.0 GHz 时为 45.71 dBsm, 2.5 GHz 时更达到

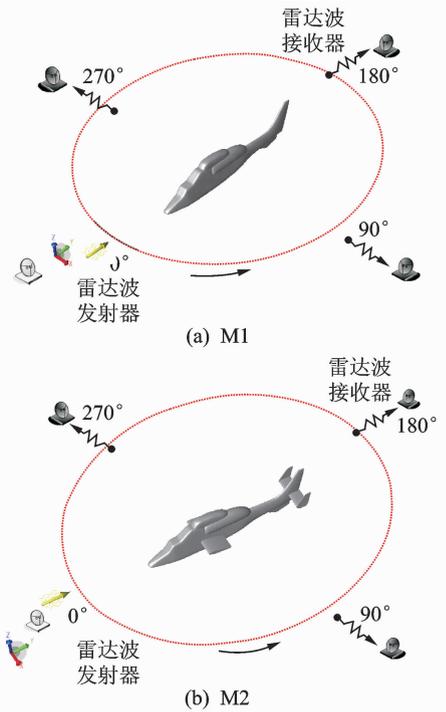


图 11 雷达波前向照射 M1 和 M2 的示意图

Fig. 11 Schematic of forward radar wave incidence on M1 and M2

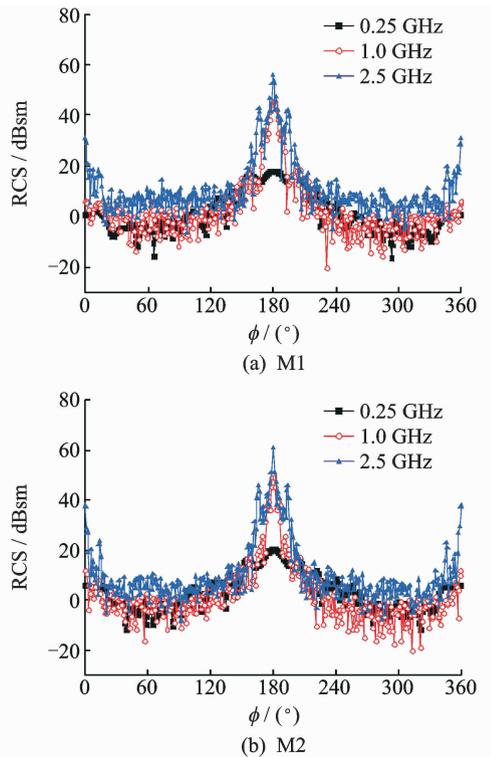


图 12 不同频率雷达波前向照射 M1 和 M2 时 RCS 分布

Fig. 12 RCS distributions of M1 and M2 with different forward radar wave frequencies

55.73 dBsm, 均有明显的增加; 同样增幅显著的还

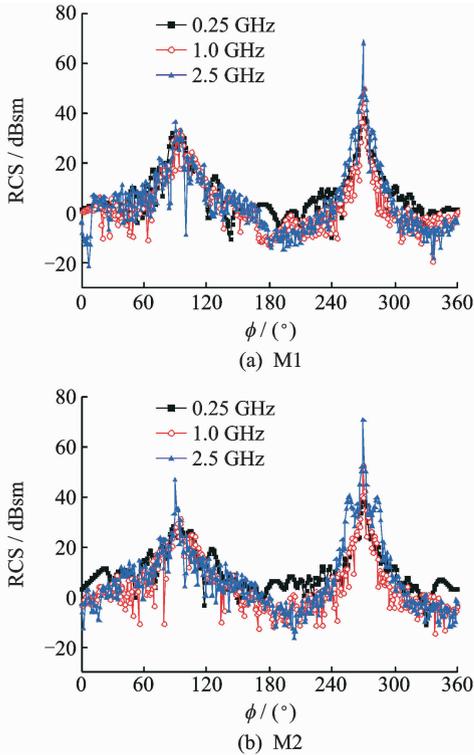


图 13 不同频率雷达波侧向照射 M1 和 M2 时 RCS 分布
Fig. 13 RCS distributions of M1 and M2 with different lateral radar wave frequencies

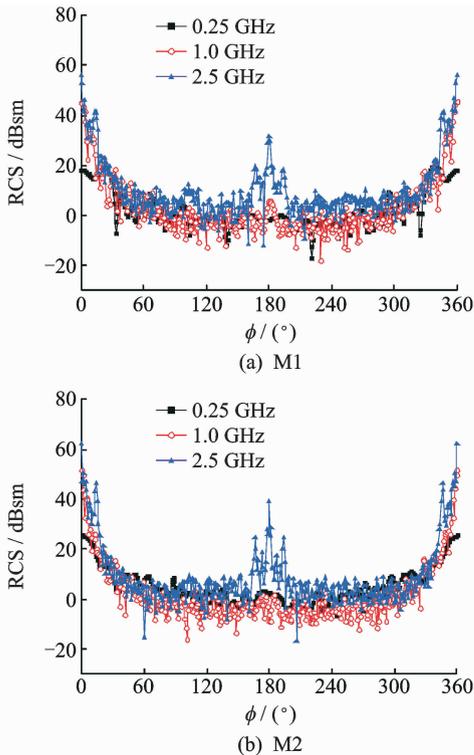


图 14 不同频率雷达波后向照射 M1 和 M2 时 RCS 分布
Fig. 14 RCS distributions of M1 and M2 with different backward radar wave frequencies

与尾追是强散射部位,需要在隐身设计中重点考虑。

从图 13 可以看出,随着雷达波入射频率的增加,RCS 并没有产生明显的增加,说明对于由大面积板块构成的机身侧面来说,谐振区与高频区的雷达波发现直升机的概率是相近的。

通过 M1 和 M2 的 RCS 分布比较,可以看出,孤立机身添加短翼和平尾组合模型在不同频率雷达波照射下的 RCS 峰值均比孤立机身要大,说明添加平尾和短翼附件会增强直升机机身的雷达散射强度。

5 结 论

为了提高直升机 RCS 特性的预估精度,文中建立了基于 CEM 方法的直升机 RCS 数值模拟方法,并对旋翼和机身的 RCS 进行了计算和分析,获得了以下结论:

(1)与高频方法相比,建立的直升机 RCS 特性的 CEM 预估方法具有较高的精度,能够满足武装直升机隐身设计中 RCS 预估的要求。

(2)对于同一系列的旋翼翼型,其厚度或弯度越大,其前缘散射性能越强,同时计算表明桨尖是旋翼的重要强散射部位。

(3)添加短翼和平尾会增加机身的雷达散射强度,在某些散射角,装配平尾或短翼的直升机的 RCS 会产生约 6~12 dBsm 的最大突增,综合散射水平强,建议采用内藏式挂架或改变平尾的端板外形等措施减弱翼面类部件的散射特征。

(4)随着雷达波的频率的增加,机身的头部和尾部角域的 RCS 峰值和均值都有明显增加,说明直升机的鼻锥和尾追在高频率雷达波照射时散射强度较大;机身侧面的大面积板造成的强镜面反射使直升机在谐振区和高频区雷达波照射下都拥有较大 RCS,易被不同频段雷达波侦测,这些在直升机隐身设计中需重点考虑。

参考文献:

- [1] 韩磊,王自荣. 雷达隐身与反隐身技术[J]. 舰船电子对抗, 2006, 29(2):34-38.
Han Lei, Wang Zirong. Radar stealth and anti-stealth technology[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2006, 29(2):34-38.
- [2] Sun Pengju, Gao Wei, Wang Yuefeng. Calculation and application of laser radar cross section for targets

- [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 597-607.
- [3] 周家波,杨凯. 武装直升机现状和发展趋势探析[J]. *国防科技*, 2007(5):40-44.
- [4] 童创明. 计算电磁学快速方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [5] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 王长清,祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.
- [7] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1966, 14(3):302-307.
- [8] Andrew W V, Balanis C A. FDTD analysis of Apache helicopter HF antennas [C] // *Antennas and Propagation Society International Symposium*. New Beach, CA, USA: IEEE, 1995:640-643.
- [9] Georgakopoulos S V, Balanis C A, Birtcher C R. Cosite interference between wire antennas on helicopter structures and rotor modulation effects: FDTD versus measurements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1999, 41(3):221-233.
- [10] Hikage T, Hiraiwa S, Nojima T, et al. Numerical estimation of the electric field distributions due to mobile radio in an aircraft cabin based on large scale FDTD analysis [C] // *EMC Europe 2011 York*. York: IEEE, 2011:523 -526.
- [11] Amburgey C, Perala R, Rigden G. Determining efficiency of HF aircraft-coupled antennas in composite aircraft using FDTD[C]// *Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*. Chicago, IL, United states: IEEE, 2012:463-468.
- [12] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [13] 陈晋吉,雷振亚,吴仕喜,等. 基于FDTD/MTL混合算法求解飞行器线束电磁敏感度[J]. *微波学报*, 2012(S3):17-20.
Chen Jinji, Lei Zhenya, Wu Shixi, et al. Application of hybrid FDTD/MTL method to simulation EMS of cable harness on aircraft[J]. *Journal of Microwaves*, 2012 (S3):17-20.
- [14] 关珊珊. 基于GPU的三维有限差分直升机瞬变电磁响应并行计算[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- [15] 聂亮,陈伟芳,夏陈超,等. 高超声速飞行器绕流流场电磁散射特性分析[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(5): 874-879,956.
Nie Liang, Chen Weifang, Xia Chenchao, et al. Analysis of scattering for the flow field of a hypersonic flight vehicle[J]. *Chinese Journal of Radar Science*, 2014, 29(5):874-879,956.
- [16] 阮颖铮. 雷达散射截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [17] 肖斌. 基于计算电磁学方法的直升机雷达散射特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [18] Cote M G, Yaghjian A D, Woodworth M B. Scattering from the Perfectly Conducting Cube[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1988, 36(9):1321-1329.
- [19] Knott E F. Tuley M T, Shaeffer J F. Radar cross section second edition[M]. Boston: SciTech Publishing Press, 2004.
- [20] 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研究[J]. *航空学报*, 2014, 35(11): 3123-3136.
Jiang Xiangwen, Zhao Qijun, Meng Chen. Effect of helicopter rotor blade shape on its radar signal characteristics[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014,35(11):3123-3136.