

基于面元边缘法的直升机 RCS 计算与分析

蒋相闻 招启军 徐国华

(南京航空航天大学直升机旋翼动力学重点实验室, 南京, 210016)

摘要:针对直升机的雷达散射截面(Radar cross section, RCS)的计算特点,将物理光学法和等效电磁流法相结合,建立了一套基于“面元-边缘”的分析方法。在该方法中,首先对复杂目标(如直升机)进行几何建模和网格划分,然后通过转换程序,获取目标的拓扑结构数据文件;其次在考虑遮挡影响下,分别进行目标表面散射场和边缘绕射场的计算;最后叠加获得总的散射场。在通过球板组合和某外形结构复杂的导弹算例验证本文分析方法有效性的基础上,对某直升机分别沿方位角、俯仰角和滚转角三个方向的RCS进行了计算和分析,并研究了挂架、导弹对直升机整体RCS的影响,获得了一些减缩直升机RCS的外形设计方案。

关键词:雷达散射截面(RCS);物理光学法;等效电磁流法;直升机;遮挡

中图分类号:V218

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2011)03-0429-06

Calculation and Analysis of RCS of Helicopter Based on Panel Edge Method

Jiang Xiangwen, Zhao Qijun, Xu Guohua

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

Abstract: Considering the characteristics of radar cross section (RCS) of helicopter, a panel edge method by combining the physical optics and the equivalent currents is developed. Firstly, geometric model and mesh generation for complex target (such as helicopter) are conducted, and topology data about the target are obtained by using transformation program. Secondly, by considering the effects of shadowing on RCS, calculations on panel and edge diffraction field of target are performed respectively. Then, total scattered field is obtained. By taking the combination model of sphere with plate and a complicated structure of missile as numerical examples, it shows that the method is effective to analyze the RCS of complex target. Finally, calculation and analysis of RCS of helicopter at different azimuth angle, rolling angle and pitching angle are performed, and the effects of bracket and missile on the whole RCS of helicopter are analyzed. Some shape design approaches aiming at reducing helicopter RCS are obtained.

Key words: radar cross section (RCS); physical optics method; method of equivalent currents; helicopter; shadowing

随着现代战场对抗的日益激烈,直升机的作战环境更加严酷复杂,提高生存能力和作战效能已成为非常突出的问题。雷达隐身性能也越来越成为直升机设计要求的一项重要指标,因此开展直升机雷达散射截面(RCS)的分析与研究,有着重要的理论

意义和实际价值^[1]。

由于保密等原因,目前国外对于飞行器外形隐身研究公开发表的文章相对较少。西方国家尤其美国从20世纪70年代中期就投入了大量人力和物力开展雷达散射截面(特别是高频区的RCS)计算方

法的研究和软件的研制,如美国的XPATCH、麦道公司的CADDSCAT、西班牙的RANUS和GRECO等软件系统已经达到工程实用阶段,可以对复杂目标进行精确计算分析,在F-117、F-22、RAH-66等飞行器隐身设计中发挥了不可替代的作用。

国内对于复杂目标的隐身技术研究起步较晚,而且大多数是针对固定翼飞行器的雷达散射截面的研究,对于直升机这类低速飞行的军事目标的RCS研究并不多见。苏东林等^[2]采用样条函数进行机身外形拟合,估算了某直升机的RCS;乔倩等^[3]利用计算机图形算法,研究了某直升机RCS的计算方法。但上述研究均未涉及挂架、导弹对直升机整体RCS特性的影响。

计算电磁学^[4]也伴随着计算机技术和数值计算方法的发展,在工程应用上越来越受到重视,如时域有限差分法(FDTD)、时域有限体积法(FVTD)和有限元法(FEM)等数值方法,但其对计算机软硬件水平要求比较高,运算时间较长。

为此,本文采用一种工程上实用的近似预估法:将物理光学法和等效电磁流法相结合,建立了一套基于“面元-边缘”的RCS计算方法,并编制了相应程序。在验证本文分析方法有效性的基础上,开展了某直升机的雷达散射截面(RCS)的计算和分析,并研究了挂架、导弹对直升机整体RCS的影响,获得了一些减缩直升机RCS的外形设计方案。

1 计算方法

1.1 雷达散射截面定义

根据理论定义,雷达散射截面^[5]即目标在单位立体角内向接收点散射的功率密度与入射在目标上的功率密度比的 4π 倍,将雷达散射截面用电磁场表示为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{H}^s|^2}{|\mathbf{H}^i|^2} \quad (1)$$

式中: σ 为雷达散射截面, R 为目标到雷达天线的距离,因入射波是平面波,目标假定为点散射体,所以距离 R 应趋于无穷大; $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$ 分别表示目标散射波在雷达处的电场强度与磁场强度; $\mathbf{E}^i, \mathbf{H}^i$ 分别表示入射雷达波在目标处的电场强度与磁场强度。

1.2 复杂目标的建模

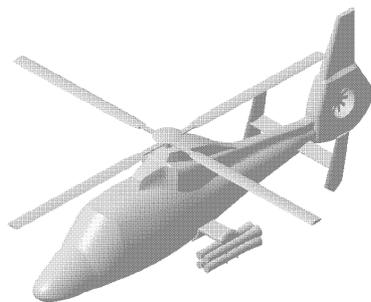
构建准确的几何模型和精确的电磁计算网格是对复杂目标(如直升机、导弹、舰艇等)进行电磁散射特性分析的必备前提条件。

(1)根据目标外形几何参数,进行计算机辅助

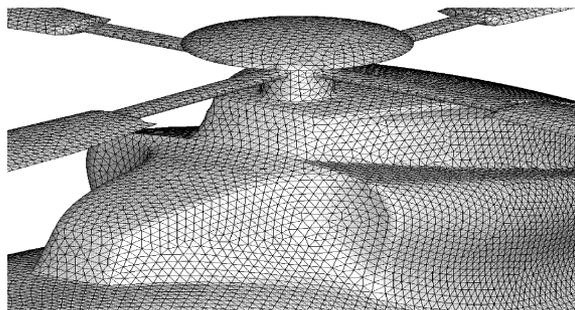
建模,得到一个有足够精度的目标几何模型,如图1(a)所示为加装挂架、导弹的某直升机几何模型图。

(2)电磁计算网格的划分,将一个复杂目标离散为由若干个三角形面元逼近的计算模型,如图1(b)所示为加装挂架、导弹的某直升机上表面凸台网格,可以看出由三角形面元拟合的计算模型具有很高的精度。

(3)通过转换程序将计算模型转换成符合RCS计算程序所需要的目标拓扑关系数据文件。



(a) 加装挂架、导弹的某直升机模型图



(b) 加装挂架、导弹的某直升机上表面凸台网格图

图1 加装挂架、导弹的某直升机的几何模型和网格划分

为了满足本文基于“面元-边缘”的RCS计算方法的前置处理需要,这里采用3个数组列表来存储电磁网格信息。

(a) 顶点表:以顶点的编号为序存放各顶点 X, Y, Z 的空间坐标值;

(b) 面元表:以表面元编号为序存放各三角面元的序号,并按逆时针方向排列;

(c) 边缘表:以边缘号为序存放各边缘的参数,包括各边缘起始和终止点的顶点序号,各个边缘的左、右面元序号。

以上3个数组就构成了目标“面元-边缘”的拓扑结构数据文件。通过RCS计算程序从数据文件中读取目标的每一个面元和边缘的坐标及编号参数,进行目标RCS的分析计算。

1.3 表面散射场的计算

物理光学法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。物理光学法的出发点是Stratton-Chu积分方程^[6]。根据Stratton-Chu公式,在物体表面外任一点的散射场强为

$$\mathbf{E}^s = \int_s [j\omega\mu(\mathbf{n} \times \mathbf{H}^T)\psi + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}^T) \times \nabla\psi + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}^T)\nabla\psi] ds \quad (2)$$

$$\mathbf{H}^s = \int_s [-j\omega\mu(\mathbf{n} \times \mathbf{E}^T)\psi + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}^T) \times \nabla\psi + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}^T)\nabla\psi] ds \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}^T, \mathbf{H}^T$ 分别表示总的电场和总的磁场, \mathbf{n} 为物体表面的单位法矢量, s 为散射体表面, ψ 为自由空间格林函数。

直接求解积分方程虽是精确解法之一,但要解出非常困难。为了简化积分运算,需把积分方程化为定积分方程,将目标表面离散为一定数量的多边形面元,计算各面元的散射,叠加得到整个目标表面的散射场。对于任意导体曲面,化简远场积分得到的散射电场强度为

$$\mathbf{E}_p = \frac{-jk_0}{2\pi R_0} e^{jk_0 R_0} \mathbf{E}_0 \sum_{i=1}^n \iint_{s_i} e^{-2jk_0 z} dx dy \quad (4)$$

令 $\mathbf{I}_p = \iint_{s_i} e^{-2jk_0 z} dx dy$, s_i 为曲面片,只要计算出 \mathbf{I}_p 值,就能求出整个目标的表面散射场。本文将目标表面离散为若干个三角形面元,它们的参数为本文1.2节中提取的目标“面元-边缘”网格数据中的顶点和面元数组,一般认为曲面片上任意一点到该替代平面的距离小于 $\lambda/16$ 时就能满足计算精度的要求,这样就把 \mathbf{I}_p 的面积分转化为线积分,得到 \mathbf{E}_p 的解析表达式,即求出了各面元的散射电场。

1.4 边缘绕射场的计算

物理光学法主要缺陷是没有考虑边缘绕射场的影响^[7],在远离镜面反射方向上,物理光学计算的场并不精确,而且随着散射方向偏离而变坏。因此,在复杂目标散射场计算中,必须考虑由边缘引起的绕射场,使理论计算具有更强的适应性。

等效电磁流法^[8]根据是,任何有限电磁流分布的远区绕射场通过一个辐射积分来求和时,将得到一个有限结果,所以该方法假设在边缘各点处存在线电流 I_e 和线磁流 I_m ,并以远场辐射积分的形式对它们求和来表示绕射场,如下式

$$\mathbf{E}_d = -jk\psi \int_C [Z I_e \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{t}) + I_m (\mathbf{s} \times \mathbf{t})]$$

$$\exp(jk \mathbf{r} \cdot \mathbf{s}) dt \quad (5)$$

式中: k 为入射波的波数, \mathbf{t} 为沿该边缘回路方向的单位矢量。将表面场积分与直尖劈的解析解相联系,可求得不含物理光学项的等效电流

$$I_e = E_{z_0}^i \frac{2jY}{k \sin^2 \beta'} D_e' - H_{z_0}^i \frac{2j}{k \sin \beta'} D_{em}' \quad (6)$$

$$I_m = H_{z_0}^i \frac{2jZ}{k \sin^2 \beta'} D_m' \quad (7)$$

将等效线电流 I_e 和线磁流 I_m 代入式(5),便可求出边缘绕射场

$$\mathbf{E}_d = -jk\psi \int_C [Z_0 I_e^{\text{back}} \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{t}) + I_m^{\text{back}} (\mathbf{s} \times \mathbf{t})] \exp(-2jk \mathbf{r} \cdot \mathbf{s}) dl \quad (8)$$

式中 C 为边缘。但求解 \mathbf{E}_d 的积分仍复杂困难,为了工程实用的计算,对边缘进行简化处理:将边缘划分为若干小段,每一小段都用直线来模拟,它们的参数是本文1.2节中提取的目标“面元-边缘”网格数据中的顶点和边缘数组,分别对离散的每一小直线段边缘进行计算,然后进行矢量叠加得到边缘绕射场。

1.5 遮挡处理

在采用“面元边缘法”计算目标RCS前,必须判别所处理的面元和边缘是否被遮挡。当雷达波照射到目标时,表面分为两个部分:照射区和阴影区。处于阴影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^[9]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射区(设入射波法矢为 \mathbf{i} ,面元外法矢为 \mathbf{n} ,

如果 $\mathbf{i} \cdot \mathbf{n} \geq 0$,表面处于阴影区;

如果 $\mathbf{i} \cdot \mathbf{n} < 0$,表面处于照射区,如图2所示。

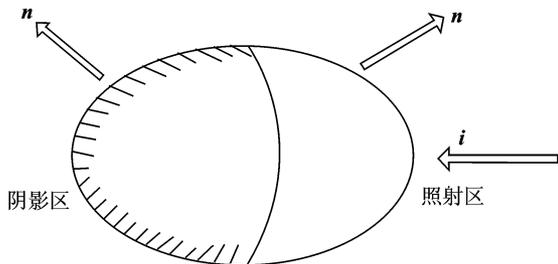


图2 目标表面的照射区和阴影区

(2)将目标上所有处于照射区的面元和边缘投影到垂直于雷达波入射方向的平面上,这样就将复杂目标的表面投影到了二维平面上。

(3)在投影平面上计算照射区各面元的几何重

心,并在入射方向上进行深度的排序,从而确定目标表面的相交区域和重叠的顺序。

(4)只有最上面一层的面元和边缘才对后向散射场有贡献。通过以上的处理,就除去了被遮挡部分的面元和边缘对后向散射场的贡献。

1.6 目标总散射场

总散射场=面元散射场+边缘绕射场

综上所述,本文建立的基于“面元边缘法”的直升机RCS计算流程如图3所示,并用Fortran语言编制了RCS的计算程序。主要分为以下几个步骤。

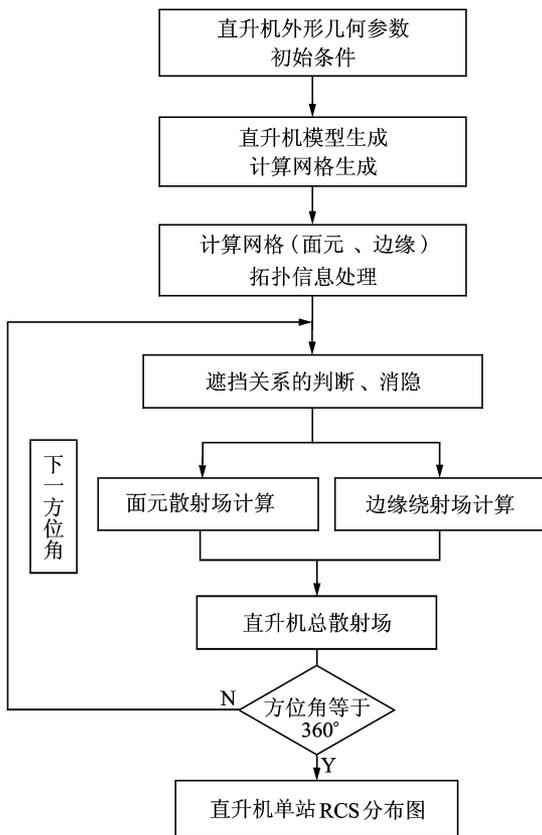


图3 直升机RCS计算流程图

第1步,确定直升机外形几何参数和初始条件,包括目标平面参数、剖面参数、入射波波长、姿态角和极化方式等;

第2步,应用计算机辅助设计对直升机进行几何建模和电磁计算网格划分;

第3步,前置处理,通过编制转换程序,构造符合RCS计算程序的直升机“面元-边缘”模型拓扑结构的3个数组文件;

第4步,直升机面元和边缘遮挡关系的判断、消隐处理;

第5步,采用物理光学法和等效电磁流法分别进行面元散射场和边缘绕射场的计算;

第6步,将所有面元的散射场和所有边缘的绕射场进行矢量叠加,得到直升机总散射场;

第7步,在平面入射波 $0\sim 360^\circ$ 的361个方位的循环中,为减小误差,入射方位每一度计算前都必须进行遮挡判断、消隐处理。通过改变俯仰、滚转角就可得到直升机在任意状态下的单站RCS计算分布图。

2 计算结果与分析

2.1 算例验证

为了验证本文方法中遮挡判断、消隐的有效性,选用有试验数据可供对比的方板-圆球组件^[10]进行分析。方板尺寸:长76.2 cm,宽50.8 cm,高2.54 cm,圆球半径30.48 cm,如图4(a)所示。计算条件:雷达工作频率 $f=10.0$ GHz,垂直极化。图4(b)给出了本文方法计算值与该组件测量值的比较,吻合较好,表明本文方法能够正确反映各部件间的电磁遮挡情况。

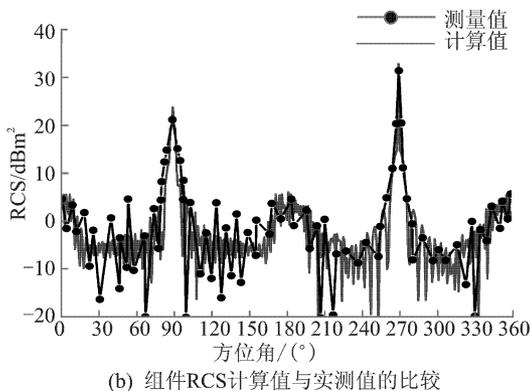
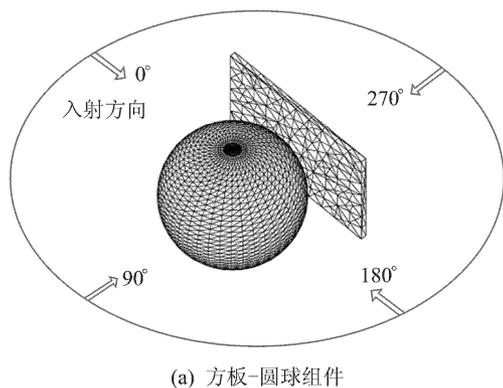
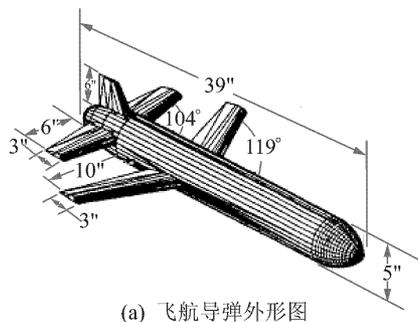


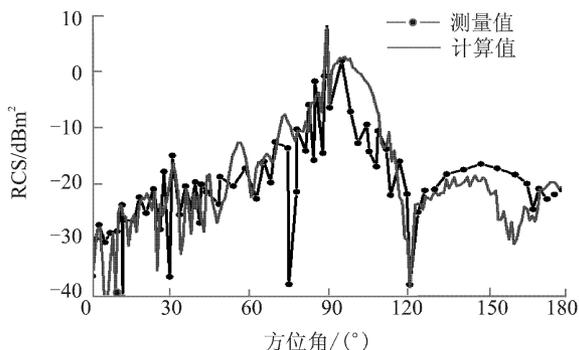
图4 组件结构及其RCS计算值与实测值比较

为了进一步验证本文方法能够有效地用于复杂目标的RCS计算,选用有试验测量数据可供对比的某外形复杂的飞航导弹^[10]作为算例,外形尺寸如图5(a)所示。计算条件:雷达工作频率 $f=12.0$ GHz,俯仰角、滚转角均为 0° ,垂直极化。

图5(b)为该导弹的计算与实测值比较。从计算结果可以看出,各个方位角的RCS计算和实测值^[10]吻合都比较好,表明本文方法对复杂目标RCS计算模拟方面是有效的,可以用来评估复杂飞行器的隐身性能。



(a) 飞航导弹外形图



(b) 飞航导弹RCS计算值和实测值的比较

图5 飞航导弹外形及其RCS计算值与实测值比较

2.2 某直升机RCS的计算结果及分析

在上述验证本文分析方法对复杂目标RCS计算有效性基础上,开展了某直升机RCS的计算与分析。该机长13.46 m,机高3.21 m,与文献[2]中计算的直升机有相似的外形尺寸。本文的坐标系规定:方位角变化为雷达波沿X方向入射,俯仰角变化为雷达波沿Y方向入射,滚转角变化为雷达波沿Z方向入射。

当前如何提高复杂电磁战场环境中航空飞行器对抗雷达远程预警、跟踪的突防能力是飞行器实现雷达隐身的关键,所以本文雷达频率选择具备远程跟踪功能的C波段($f=5.0$ GHz,垂直极化)对某直升机进行散射特性的分析。

为了便于比较挂架、导弹对某直升机RCS的影响,本文规定某直升机为I型,某直升机加装挂架、导弹为II型。图6为II型直升机在雷达波沿X,Y,Z入射方向图示,图7(a,b,c)为雷达波分别沿X,Y,Z入射方向I型和II型直升机RCS计算比较

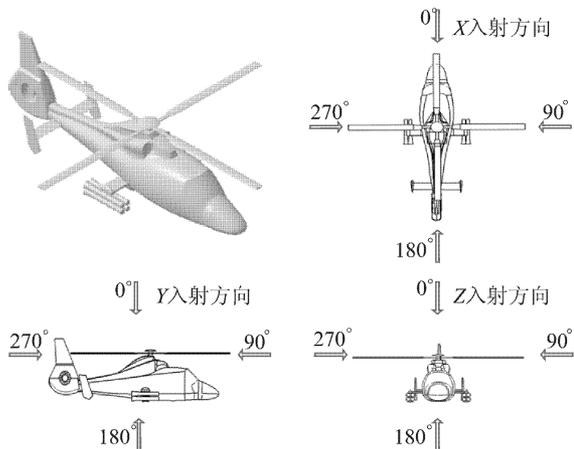


图6 II型直升机在雷达波沿X,Y,Z入射方向图示

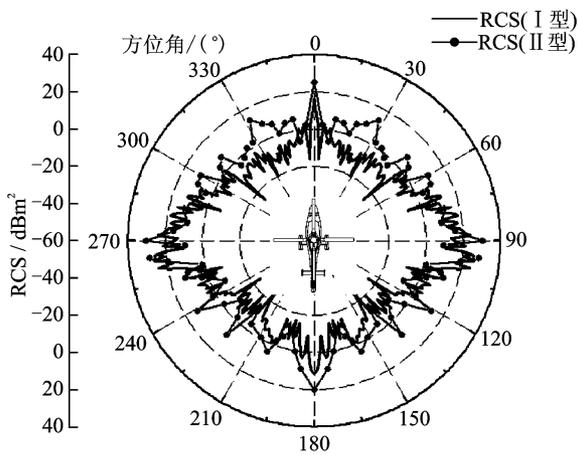
的极坐标图。

由图7可以看出以下几点:

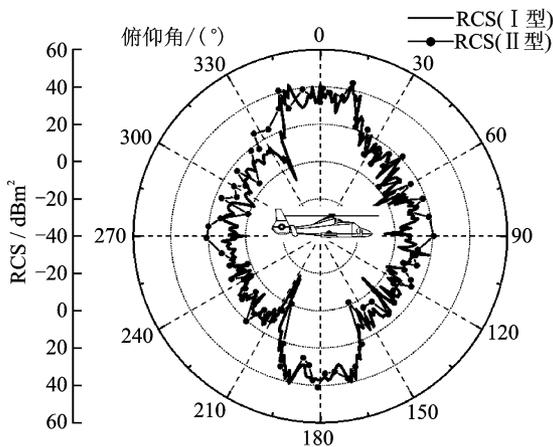
(1)是在雷达探测最具威胁的鼻锥(图7(a),方位角 $0\sim 30^\circ$),II型直升机RCS的算术均值为 5.8 dBm^2 ,I型直升机为 2.7 dBm^2 ,均值相差为 3.1 dBm^2 。在方位角 0° ,II型直升机RCS为 25.1 dBm^2 ,I型直升机为 16.5 dBm^2 ;在尾追(图7(a),方位角 $150\sim 180^\circ$),II型直升机RCS的算术均值为 0.2 dBm^2 ,I型直升机为 -3.8 dBm^2 ,均值相差为 4.0 dBm^2 。在方位角 180° 时,II型直升机RCS值为 19.9 dBm^2 ,I型直升机为 11.6 dBm^2 。图7(b)也可以看出来,产生这现象的主要是由挂架、导弹的端部和尾部平板面的几何外形引起的,故在鼻锥、尾追方位上均产生极强的镜面散射。

(2)是I型和II型直升机侧向(图7(a),在方位角 90° 附近),II型直升机RCS的最大值为 30.2 dBm^2 ,I型直升机为 26.2 dBm^2 ,相差为 4.0 dBm^2 ,但都达到雷达波X入射方向下的峰值,主要原因是机身在侧向方位,镜面散射面积最大,RCS达到峰值,由图7(c)也可以看出在滚转角 90° 方位附近RCS值偏大。

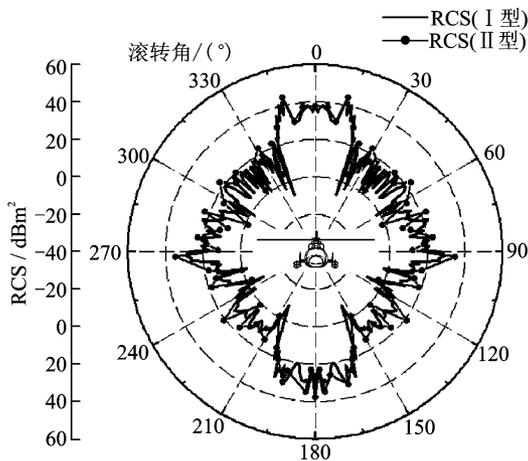
(3)是II型直升机RCS幅值在图7(a)中方位角 $120\sim 180^\circ$ 角域比方位角 $0\sim 60^\circ$ 角域变化剧烈,在方位角 $120\sim 180^\circ$ 角域,II型直升机RCS的算术均值为 0.6 dBm^2 ,I型直升机为 -5.9 dBm^2 ,均值相差为 6.5 dBm^2 ;在方位角 $0\sim 60^\circ$ 角域,II型直升机RCS的算术均值为 3.8 dBm^2 ,I型直升机为 -0.2 dBm^2 ,均值相差为 4.0 dBm^2 。主要原因是由于导弹前窄后宽的几何外形,所以在尾追附近比鼻锥附近引起更强的RCS波动和镜面散射。



(a) 雷达波沿X入射方向时RCS计算比较



(b) 雷达波沿Y入射方向时RCS计算比较



(c) 雷达波沿Z入射方向时RCS计算比较

图7 雷达波沿X,Y,Z入射方向时(I型和II型)直升机RCS计算比较

3 结 论

本文将物理光学法和等效电磁流法相结合,建立了一套基于“面元-边缘”的RCS分析方法,考虑了遮挡处理问题,对某直升机的雷达散射截面进行

了计算和分析,并研究了挂架、导弹对直升机整体RCS的影响,获得结论如下:

(1)本文建立的基于“面元-边缘”的RCS计算方法,对复杂目标(如直升机、导弹、舰艇等)RCS计算具有较高的精度和效率,能满足工程应用的要求;

(2)对直升机机身侧向来说,为减小其镜面散射,提高直升机的隐身和突防能力,在满足气动外形设计基础上尽量增大其曲率,从而达到减缩侧向RCS的效果;

(3)直升机的挂架、导弹的散射强度很大,不能忽视。在加载导弹时,尽量使用曲率大的(如橄榄形、圆锥等)做弹头和弹尾,通过减少鼻锥和尾追区附近的镜面散射缩减RCS值。

参考文献:

- [1] 张呈林,郭才根. 直升机总体设计[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 苏东林,宗国明,吕善伟. 武装直升飞机雷达散射截面的估算方法[J]. 北京航空航天大学学报,1994,20(3):248-252.
- [3] 乔倩,许家栋,刘萌萌,等. 直升机的RCS计算[J]. 航空计算技术,2009,39(3):56-58.
- [4] Niziolek M. Review of methods used for computational electromagnetics [C] // Electrodynamics and Mechatronics 2nd International Students Conference Proceeding of the IEEE. [S. l.]:IEEE, 2009:15-16.
- [5] Jenn D C. Radar and laser cross section engineering [M]. Second Edition. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.
- [6] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. Radar cross section second edition [M]. Raleigh: SciTech Publisher,2004.
- [7] Cui S M, Sakina K, Ando M. A mathematical proof of physical optics equivalent edge currents based upon the path of most rapid phase variation[J]. IEEE Transactions on Electronics, 2000, E83-C: 659-663.
- [8] Knott E F. The relationship between Mitzner's ILDC and Michaeli's equivalent currents[J]. IEEE Tran AP, 1985,33(1):112-114.
- [9] 陆润民. 计算机图形学教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [10] Youssef N N. Radar cross section of complex targets [J]. Proceeding of the IEEE, 1989,77(5):722-734.