

引用格式: 杜晓佳, 崔玫. 初步设计阶段桅杆外形的隐身性评估与改进[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 127-132.
DU Xiaojia, CUI Mei. Stealth evaluation and improvement of mast configuration in the preliminary design stage[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(2): 127-132.

初步设计阶段桅杆外形的隐身性评估与改进

杜晓佳, 崔玫

中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: 桅杆作为重要的雷达波散射源, 将直接影响到整个舰船的隐身性。在舰船设计初期, 如何评估和改进桅杆的隐身性显得十分重要。以一个典型的封闭式桅杆为研究对象, 分析评估参数对隐身性计算结果的影响, 得到该桅杆的主要反射机制, 识别出桅杆大部分 RCS 峰值是由单次反射引起, 并给出桅杆外形隐身调整建议。结果显示, 若发生横摇, 附属平台和桅杆主体结构产生的二面角效应会增强, 所得结论可为初步设计阶段舰船桅杆的隐身性评估和改进提供参考。

关键词: 桅杆; 雷达散射截面积; 评估; 隐身性

中图分类号: U667.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.02.018

Stealth evaluation and improvement of mast configuration in the preliminary design stage

DU Xiaojia, CUI Mei

China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: The stealth performance of warships is directly affected by its mast; therefore, the analysis and evaluation of the stealth performance of the ship's mast in the preliminary design stage is the main research purpose of this paper. By taking a typical enclosed ship mast as the research model, the influences of several important parameters on the stealth performance are analyzed, with the major scattering characteristic of the mast being investigated. It is seen that most of RCS peak points are caused by the specular reflection, and the optimal adjustment of mast configuration is presented. When the ship is rolling, the dihedral angle effect caused by the affiliated platform and main structure would intensify. This paper provides a reference for the stealth performance evaluation and improvement of mast configuration in the preliminary design stage.

Key words: warship mast; radar cross section; evaluation; stealthiness

0 引言

隐身技术是通过降低目标在特定区域内的可探测信号, 进而降低敌方设备探测概率的一项综合技术^[1-2]。在所有可探测的舰船信号中, 雷达反射是水面舰船最主要的威胁之一。因此, 舰船的雷达隐身性成为提升舰船在战场上的突袭能力和生存能力的重要指标之一^[3-4]。

受地球曲率的限制, 桅杆系统外形设计的优

劣将直接影响到全舰雷达隐身性^[5]。目前, 舰船的隐身性设计采用的是全舰雷达散射截面积(RCS)指标分配方法, 一般是将桅杆作为独立的部件进行隐身性研究^[6-7]。在设计时, 桅杆外形必须达到被分配的隐身性指标要求。因此, 有必要单独针对桅杆隐身性开展研究。

1 RCS 高频计算方法

舰船的 RCS 量级较高, 而直接采用应用于飞



行器行业的高精度 RCS 计算方法会带来极大的计算工作量。在舰船封闭式桅杆设计初期,设计者更注重其主要反射原因的分析 and 隐身性的改进,这就允许设计者在计算精度与工作量上进行平衡。

桅杆的特征尺寸远大于雷达波长,其 RCS 计算问题属于电大尺寸问题,可以用高频近似计算方法来处理此类问题。本文将选取几何/物理光学混合法作为桅杆的 RCS 计算方法。

几何光学法(GO)由传统的光学规律推导而来。几何光学近似假定雷达波主要沿着射线路径的特殊轨迹进行传播^[8]。雷达波入射到物体表面上的行为可用 Snell 定律来表述,此时,后向雷达截面积可表述为

$$\sigma = \pi \rho_1 \rho_2$$

(1)

式中, ρ_1 和 ρ_2 为物体表面在反射点处曲线的双曲率半径。当曲线半径无限大时,便无法使用几何光学法。

物理光学法(PO)推导的出发点为 Stratton-Chu 射场积分公式^[9]。物理光学法设定阴影边界的电流为 0,在偏离入射方向较大角处或阴影区域内的散射场积分是不准确的。当计算多次反射时,反射每多增加一次,物理光学积分就会多增加两重积分,导致计算时间急剧增加,因此,物理光学法不适于计算多次反射。

几何/物理光学混合法则是通过几何光学方法计算目标被雷达照亮区域和雷达波沿目标的传播途径,利用物理光学法来计算照亮区域的 RCS,因此,该方法能够避免几何光学法和物理光学法的主要缺点。

2 桅杆隐身性评估参数设定

选取与“地平线”级驱逐舰相似的桅杆作为外形隐身评估的几何模型。在建模时,对桅杆进行相应的简化,忽略安装在桅杆上的雷达和通讯等电子设备(图 1),其中桅杆主体和雷达平台均为四面体,大多数面板与垂直面的夹角为 7°~8°。钢材和频率选择表面(FSS)材料是舰船桅杆的主要材料。考虑到外形隐身是本文的主要研究目的,因此,将桅杆视为理想导体,桅杆的内部电场为 0。

考虑到反舰雷达和早期预警雷达的应用性能,本文考虑 L,S,C,X 和 Ku 波段中心频率下桅杆的隐身性,对应的雷达波波长为 20,10,5,3 和 2 cm。舰船所要面对的探测环境主要来自敌方单个舰船或空中武器平台,在海军领域,单站隐身性

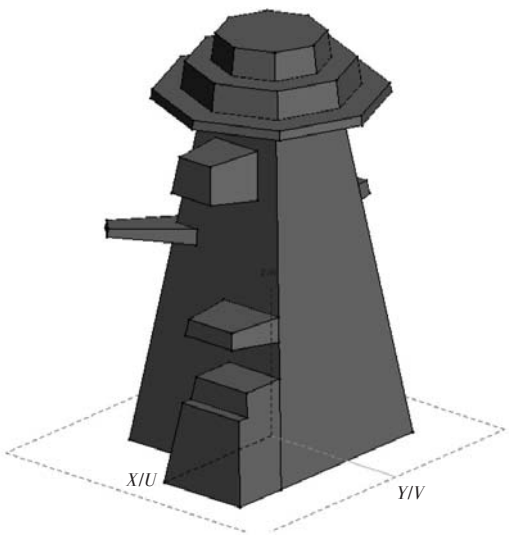


图 1 桅杆几何模型

Fig.1 Geometric model of the mast

更为重要。

舰船 RCS 是随照射角度的变化而急剧变化,要在所有角度上实现雷达波隐身是不可行的,隐身设计的目的应是降低在雷达危险区域的 RCS^[10]。因此,设定桅杆的雷达波威胁区域仰角为 0°,水平角为 0°~360°。

3 桅杆隐身性影响因素分析

3.1 雷达波参数的影响

研究桅杆 RCS 与雷达波的频率和水平角的关系。桅杆面对不同频率(垂直极化)雷达波时的 RCS 分布如图 2 所示,其频率间隔为 1 GHz。由图 2 可知:在不同频率雷达波的照射下,桅杆的“亮点”位置不变;频率越高,RCS 值分布超过 30 dBm² 的区域就越小,即 RCS 峰值区域随频率的升高而减小;桅杆在 0°和 180°附近区域的雷达波反射总是最大。如果敌人的雷达位于船舶的正前方或正后方,则此时桅杆的反射能量是最强的。当入射方向在接近 90°和 270°的水平角时,各个频率下 RCS 的强度也很高。

研究 RCS 与雷达波波长及极化方向的关系。不同极化下威胁区域内 RCS 计算结果平均值和最大值的变化曲线如图 3 所示。在水平极化和垂直极化模式下,RCS 随频率的变化趋势相似,极化方向对非最大值的角度影响更大。

RCS 平均值和最大值随频率的变化规律是复杂的,即使是相同的极化方向,也会出现振荡现象。但平均值和最大值有相似的变化趋势,这是因为 RCS 最大值一般都远大于其他角度的 RCS 值,故最大值在平均值中占有很大的比重。

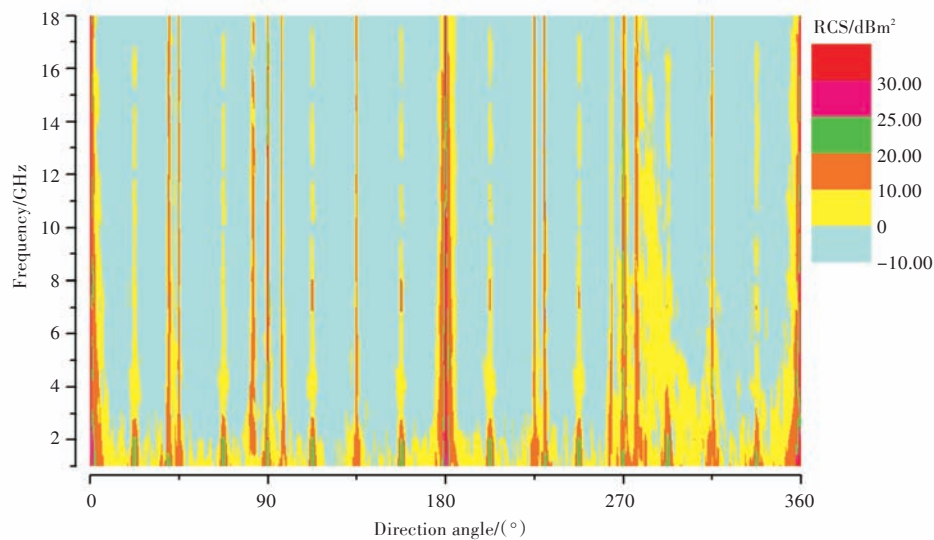


图2 不同频率和角度的桅杆 RCS 分布
Fig.2 RCS distribution of mast in different frequencies and angles

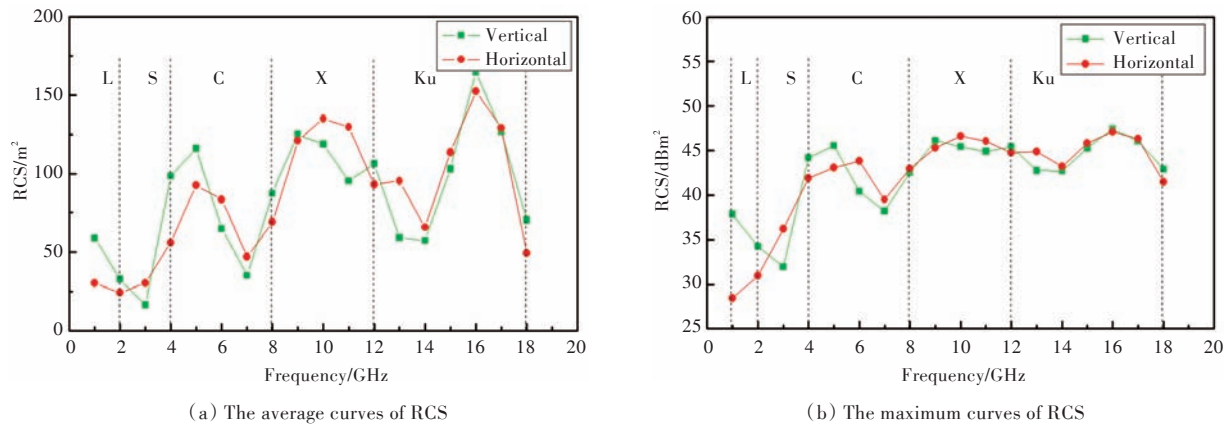


图3 极化/波长的影响
Fig.3 Influences of wavelength and polarization

3.2 船体摇动的影响

受波浪和风的影响,舰船的摇动不可避免,因

此有必要研究舰船横摇对桅杆 RCS 的影响^[11]。将该舰船横摇角范围设置为 $\pm 30^\circ$,横摇角采样间隔为 5° ,桅杆 RCS 分布计算结果如图4所示。

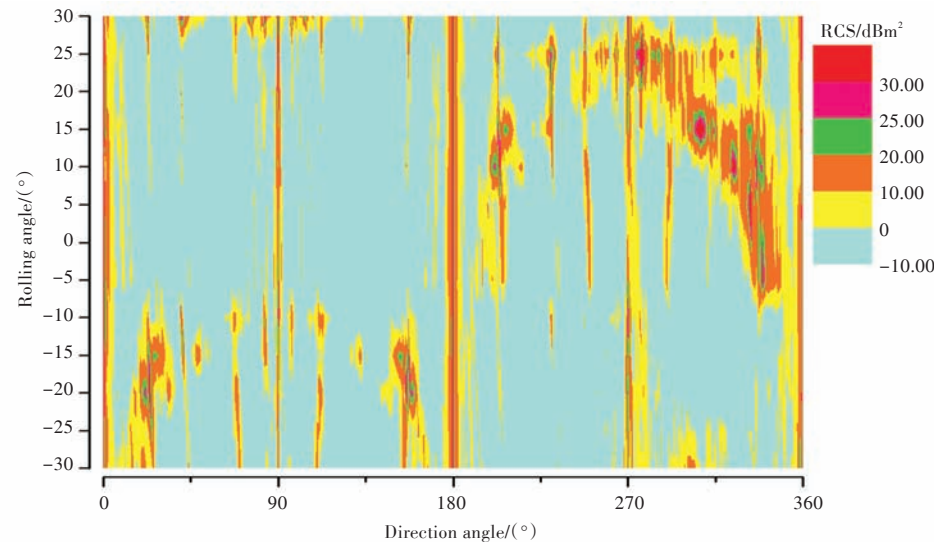


图4 随船体摇动的 RCS 分布
Fig.4 Variations of RCS with ship rolling

虽然发生了横摇,但桅杆在前方或后方的横截面几乎没有变化,在 0° 和 180° 附近的 RCS 值基本稳定;当横摇角小于 10° 时,桅杆 RCS 峰值区域基本没有变化,即小角度横摇时对桅杆 RCS 的影响较小;当桅杆发生大角度的横摇时, RCS 峰值区域有较明显的变化,特别是在右倾情况下,形成了一个较大的散射峰值区域。由于 RCS 的上升是区域性的,故可判断为由多次反射造成。与几何模型进行对比,可判别这些峰值区域是由桅杆外伸的承载雷达基座与桅杆主体结构组成的二面角所引起。可见,舰船横摇会增加桅杆的二面角效应。

4 雷达反射特征分析

雷达反射特征分析的主要目的是了解桅杆反射雷达波的主要特性,为桅杆隐身性的评估和改进提供支撑。可通过反射机制分析和主要反射源分析这2部分的研究来达到这个目的。本节选取的评估雷达波为垂直极化的 X 波段雷达波。

4.1 桅杆雷达波反射机制分析

桅杆单次/两次反射雷达波反射的 RCS 计算结果如图 5 所示。计入二次反射后,大多数角度的 RCS 峰值没有明显变化,桅杆大部分 RCS 峰值主要由单次反射引起。当入射波为 0° 时 RCS 值最大,在单次反射时为 22.5 dBm^2 ,二次反射时增长到 46.6 dBm^2 。在这个入射角度下,二次反射比单次反射更为强烈。二次反射带来的是区域角度的 RCS 变化。

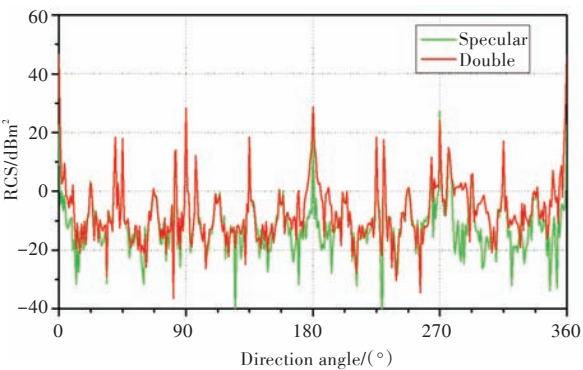


图5 单次/二次反射计算结果对比
Fig.5 Comparison of the specular/double reflection

对比 RCS 峰值角度和桅杆几何模型,可以得到如下判断:二次反射是由桅杆外伸结构和桅杆主体结构组成的二面角所产生。在下一小节也将证明这一结论。

图 6 为分别计入二次/三次反射后的 RCS 计算结果对比。由图可看出,两条曲线仅在少数角度上有微小的差别,且在一定程度上可被忽略。故

在威胁区域内,桅杆对雷达波的第 3 次反射非常小,由此可判定第 4 次反射的影响将会更小。当使用 GO/PO 法计算桅杆 RCS 时,一般三次反射计算结果即能满足计算需求。

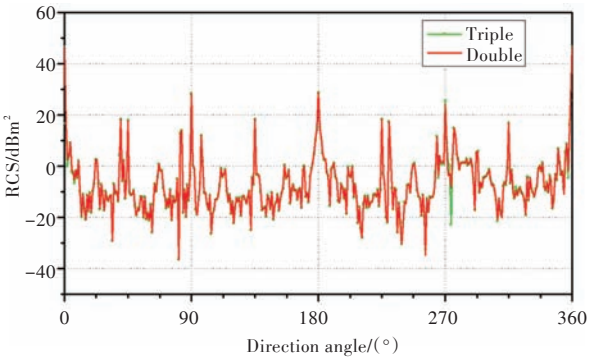


图6 两次/三次反射对比
Fig.6 Comparison of the double/triple reflection

4.2 桅杆雷达波反射源分析

为了找到桅杆的主要反射源,将桅杆的附属雷达平台分为了 6 个部分,标号如图 7 所示。图 8 所示为分别去除 6 个雷达承载平台后的 RCS 计算结果。从图 8(a)中可以看出,去除#1 雷达承载平台后,桅杆 RCS 在 $23^{\circ}, 67^{\circ}, 111^{\circ}, 157^{\circ}, 202^{\circ}, 243^{\circ}$ 和 337° 附近处的峰值点消失。而在图 5 所示的桅杆单次反射 RCS 计算结果中,这些峰值点是存在的。鉴于这些入射角度与#1 雷达承载平台的几何关系,可以推得这些峰值点是由#1 雷达承载平台的单次反射所造成。

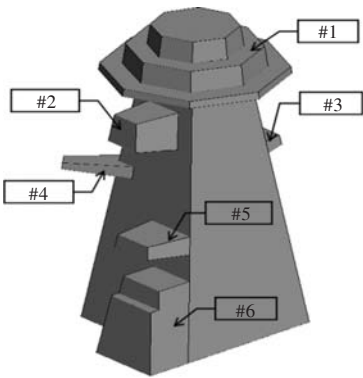
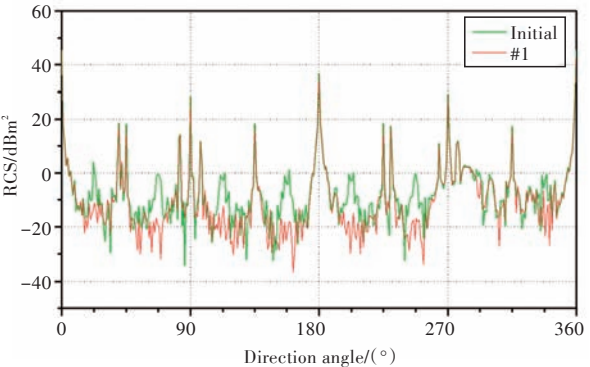


图7 附属雷达基座示意图
Fig.7 Schematic diagram of subsidiary radar base label



(a) 去除#1平台前、后的 RCS

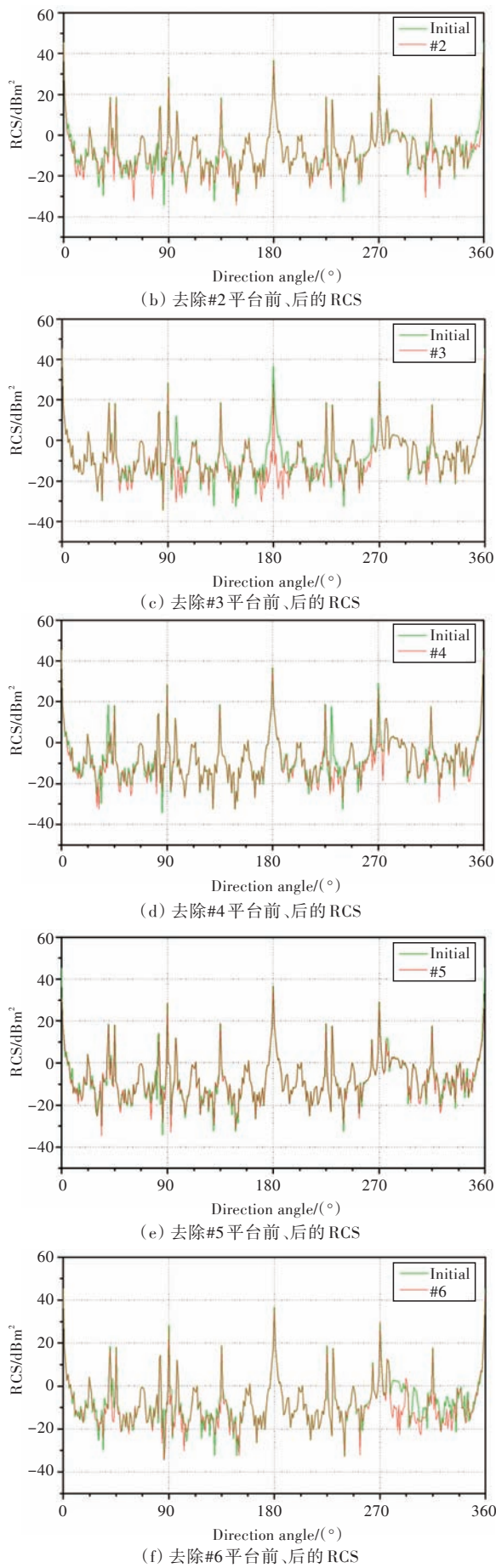


图8 分别去除附属平台前、后的RCS计算结果对比
Fig.8 Comparisons of RCS computing results with and without subsidiary base, individually

#2, #5和#6附属平台为在桅杆前面突出的矩形体。从图8(b)和图8(e)可以看到, #2和#5结构只影响到了桅杆正前方角的RCS值, 未影响到其他角度。去除#5附属平台后, 0°方向的RCS峰值从45.5 dBm²下降到了30.9 dBm², 可见#5结构为桅杆0°方向雷达波反射的一个主要源。在图8(f)中, 去除#6平台后, 桅杆RCS在283°~344°区域内显著减少, 而其他角度的影响可以忽略, 经与几何模型对比, 可判定这是由#6平台右侧板与主桅体组成的二面角所产生的效果。因此, 可判定#2平台的设计较好, #5平台的前侧板和#6平台的右侧板需进行调整, 建议加大其与桅杆主体结构的夹角。

从图8(c)可以看到, 去除#3附属平台后, 当入射方向处于在97°, 180°和223°附近时, RCS峰值有较明显的降低, 可判定#3平台前侧板和左、右侧板设计不佳, 建议增大前侧板与垂直面的夹角, 增大与桅杆主体结构的夹角。

从图8(d)可以看出, 去除#4结构后, 将显著降低40°和230°处的RCS, 但是对其他角度的影响较小, 可忽略。由于多次反射效应往往是区域性的, 经与几何模型对比, 可判定这2个峰值是由#4结构两侧面板的单次反射所造成, 建议增大这2个板与垂直面的夹角。

由于所有的附属平台对0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°和270°处的RCS峰值影响不大, 故可判断这些角度的峰值是由桅杆主体结构单次反射产生的。可以通过改变桅杆主体结构倾角来改善这些角度的RCS峰值。

5 桅杆外形隐身性评估流程分析

从本文的分析和计算结果来看, 针对桅杆这类舰船外露结构外形的隐身性评估和优化, 其基本流程(图9)可设定为:

- 1) 对桅杆RCS的危险角度考评范围进行限定, 只针对单站雷达进行考评;
- 2) 在计算量和实际精度需求上进行衡量, 选取RCS计算方法;
- 3) 建立合理的桅杆电磁计算模型, 一般情况下不计入桅杆上的设备, 对桅杆结构和材料特性进行简化;
- 4) 计算不同雷达参数下的桅杆RCS, 得到桅杆RCS随雷达参数的变化规律;
- 5) 选取一典型雷达参数, 对该雷达波参数下的桅杆RCS进行计算分析, 对比分析单次反射和多次反射的计算结果, 分析桅杆的主要散射特征;
- 6) 对比不同桅杆模型下的RCS分布, 确定桅

杆RCS主要反射源,得出桅杆各部位的设计优劣,给出外形调整建议;

7) 为下一设计阶段的桅杆RCS考评做准备。

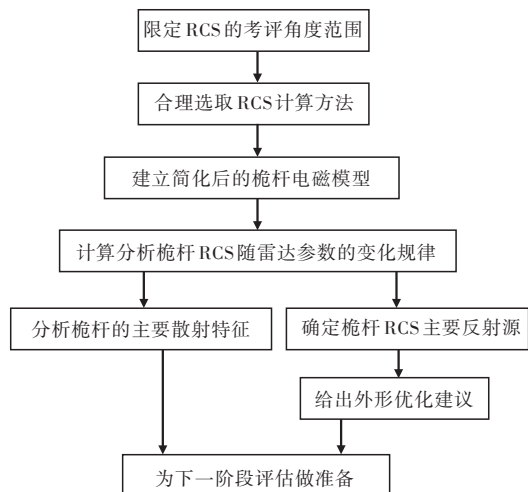


图9 外形隐身评估流程

Fig.9 The evaluation process of stealth shape

6 结 论

桅杆作为雷达反射的重要来源之一,对舰船整体的隐身性有较大影响。本文在对一个典型的封闭式桅杆的外形进行隐身性评估与分析后,得出以下结论:

1) 桅杆大部分 RCS 峰值主要由单次反射引起。多次反射较弱,且为区域性的。多次反射主要由雷达平台与桅杆主体组成的二面角产生。需调整# 3, # 4, # 5 和 # 6 雷达承载平台部分面板的角度,以获得更好的隐身效果。

2) 对于水平和垂直极化方式,RCS 平均值和最大值随频率的增加表现出了相同的变化趋势。随着频率的增加,RCS 峰值区域被压缩。若发生较大横摇角,RCS 的峰值区域会发生明显变化,主要由附属平台和桅杆主体结构产生的二面角效应增强所致。

同时,本文还形成了一套桅杆隐身性评估和改进的流程,通过该流程,可以辅助指导初步设计阶段舰船外露结构的隐身性设计。

参考文献:

[1] 肖芳,李永新,李鸣.水面舰艇雷达隐身技术[J].舰

船电子对抗,2009,32(2):35-37.

XIAO Fang, LI Yongxin, LI Ming. Radar stealth techniques of surface warship [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(2): 35-37.

[2] KHAN J, DUAN W Y, SHERBAZ S. Radar cross section prediction and reduction for naval ships [J]. Journal of Marine Science and Application, 2012, 11(2): 191-199.

[3] 朱炜,陈炜,冯洋.水面舰船雷达波隐身技术与总体设计[J].中国舰船研究,2015,10(3):1-6,56.

ZHU Wei, CHEN Wei, FENG Yang. Radar stealth technology of surface combatant ships and overall system design [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(3): 1-6, 56.

[4] BAHRET W F. The beginning of stealth technology [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(4): 1377-1385.

[5] 吕明云,黄敏杰,武哲.封闭式隐身桅杆的初步设计与效果评估[J].电波科学学报,2010,25(5):833-838.

LV Mingyun, HUANG Minjie, WU Zhe. Preliminary design and effect evaluation of enclosed stealth mast [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(5): 833-838.

[6] 吴启华.角度、频率因素对隐身桅杆RCS测量结果影响研究[J].舰船工程研究,2007(4):40-45.

[7] 程子君,吴启华.隐身桅杆与主船体耦合RCS特性研究[J].中国舰船研究,2011,6(3):45-48.

CHENG Zijun, WU Qihua. The RCS characteristics of coupling between stealth mast and main hull [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2011, 6(3): 45-48.

[8] RUCK G T, DONALD E B, WILLIAM D S. Radar cross section handbook [M]. New York: Plenum Press, 1970: 50-63.

[9] 庄钊文,袁乃昌,莫锦军.军用目标雷达散射截面预估与测量[M].北京:科学出版社,2007:242-245.

[10] 杨德庆,常少游.舰艇外形雷达隐身设计特征面法[J].中国造船,2008,49(2):113-119.

YANG Deqing, CHANG Shaoyou. The characteristic cross-section method on the shape radar stealthy design of naval vessels [J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(2): 113-119.

[11] BRIGGS J N. Target detection by marine radar [M]. UK: The Institution of Engineering and Technology, 2004: 420-452.