

舰船封闭式桅杆雷达隐身优化分析

杨 颀*, 杜晓佳, 洪 明

(大连理工大学 运载工程与力学学部 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 桅杆作为重要的雷达反射源,直接影响到舰船的整体隐身性能,对其进行外形雷达隐身优化非常有意义.在特定的雷达探测条件下,以某封闭式八边形桅杆为例,利用自适应遗传算法,分别以威胁区域内的雷达散射截面(RCS)最大值、平均值,被监测平均概率以及大于RCS临界值的概率4种评价指标为目标函数进行桅杆形状的特征参数优化,并对不同指标的优化结果进行对比分析.优化后桅杆的隐身性能均有明显提升,4种优化结果所对应的RCS面积分布具有一定的相似性,同时结果也表明针对特征角度的RCS优化是无效的.

关键词: 舰船桅杆;雷达散射截面;隐身;优化;遗传算法

中图分类号: TN958.93 **文献标志码:** A

0 引言

随着军事科技的进步,隐身性已成为新时期舰船的重大研究方向之一.由于雷达探测是当前水面舰船隐身面临的最主要威胁,为提高己方舰船的生存能力和突防能力,保证战术上的突然性,针对舰船的外形进行雷达隐身设计是非常重要的.舰船外形雷达隐身设计是通过改进和融合舰船原有外形,来降低舰船在威胁区域内的雷达散射截面(radar cross section, RCS),其本质是一个RCS的优化设计过程^[1].

桅杆系统一般处于舰船的最高位置,同时集中了大部分侦讯设备,根据地球表面弯曲效应,它是舰船最早被雷达探测的散射源^[2].即使舰船桅杆已在水平线上消失,桅杆系统仍可能产生很大的雷达散射.因此必须针对桅杆系统进行外形雷达隐身优化设计^[3].本文以一个封闭式八边形桅杆为研究对象,分别以不同的评估标准作为目标函数,利用自适应遗传算法对其进行外形隐身优化,得到不同隐身评估标准下桅杆的最优设计方案.

1 高频 RCS 计算方法

桅杆基本尺寸一般远大于对舰船进行侦测的雷达波长,因此桅杆 RCS 计算属于高频区问题.

由于计算机处理速度和存储量的限制,经典解法、矩量法和时域有限差分法都不适合此类电大尺寸的计算,因此在进行大型水面舰船雷达散射截面计算时,适于采用快速多极算法(FMM)或高频近似方法进行求解.

与飞行器有所不同的是,舰船更多的是面对敌方单站雷达的探测,因此本文只针对桅杆的单站隐身性能进行研究.快速多极算法在计算双站RCS时在精度上有优势,但若用于单站RCS计算时对应每个入射角度都必须重新计算表面电流分布,故其对复杂目标单站RCS的计算量是非常大的^[4].因此根据现有条件,本文选取高频计算方法中的物理光学法进行桅杆RCS求解计算,采用的电磁散射计算平台为FEKO软件.

物理光学法推导的出发点为Stratton-Chu散射场积分公式,它根据高频场的局部性原理,在求解表面感应电流时忽略了各部分感应电流之间的相互影响.同时物理光学法假定电磁场的高频区域散射体阴影区内场值为零,如果某一面元或者边缘处于照射的阴影区,则该面元或边缘不会对目标产生散射贡献,这样RCS的求解过程就会极大简化^[5].对于理想导体,当入射波在单位矢量 $\mathbf{i}$ 方向上传播,电场强度为 E_0 ,磁场方向与单位

收稿日期: 2012-02-13; 修回日期: 2013-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079027).

作者简介: 杨 颀*(1975-),女,博士,副教授, E-mail: yangyanghit@yahoo.com.cn.

矢量 $\mathbf{h}_i$ 平行, 此时散射电场强度 E^s 的物理光学法积分表达式为

$$E^s = -\frac{j2kE_0 e^{jkr}}{4\pi R} \int_S \mathbf{s} \times [\mathbf{s} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{h}_i)] e^{jkr \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{s})} dS \quad (1)$$

式中: $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$, μ 和 ϵ 分别为材料的磁导率和介电常数; $\mathbf{s}$ 为散射方向的单位矢量; $\mathbf{n}$ 为表面的外法线矢量; $\mathbf{r}$ 为表面单元 dS 的位置矢量; R 为场点到原点的距离. 由以上推导, 将式(1)代入雷达方程化简可得 RCS(用符号 σ 表示)平方根的物理光学法表达式:

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_S \mathbf{n} \times \mathbf{e}_r \times \mathbf{h}_i e^{jkr \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{s})} dS \quad (2)$$

式中: $\mathbf{e}_r$ 为接收装置电极化方向的单位矢量. 此时只需求出每个面元所对应的 $\sqrt{\sigma}$, 然后直接相加, 取模的平方, 即可得散射体在该入射角度下的 σ . 物理光学法没有考虑评估模型的边缘绕射现象, 但对桅杆这种方形体结构, 镜面反射是最主要的散射机制, 边缘绕射所占比重较小, 物理光学法满足精度要求.

2 隐身性能评估标准

舰船桅杆 RCS 一般随雷达探测目标的方位角改变而急剧变化. 因此, 如何评估舰船 RCS 优劣是一个值得研究的问题. 目前在评估飞行器隐身性能时可用的标准有: 飞行器在威胁区域内 RCS 面积的平均值 $\bar{\sigma}$ 、最大值 $\sigma_{\max}$, 飞行器被雷达检测的平均概率 $\bar{P}_d$ 和大于 σ_{cr} 的概率 P_{cr} [6]. 本文将这些评价指标引入舰船桅杆雷达隐身性能评估中.

2.1 威胁区域内 RCS 最大值

目标在威胁区域内 RCS 最大值 $\sigma_{\max}$, 反映的是目标处于最不利探测角度时产生的回波强度, 即

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N) \quad (3)$$

式中: N 为威胁区内 RCS 计算的次数. 这种评价标准的优点是数据的处理比较简单, 缺点是忽略了在威胁区内除最大值外其他角度的 RCS 分布情况.

2.2 威胁区域内 RCS 平均值

目前评价飞行器的隐身性能最常用的标准为目标在威胁区域内 RCS 平均值, 即

$$\bar{\sigma} = \text{avg}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N) \quad (4)$$

这种评价标准的优点是计算过程简单直接, 可反映目标在威胁区域内 RCS 整体分布情况, 缺点是忽略了 RCS 在威胁区的分布规律.

2.3 被雷达检测的平均概率

当雷达性能参数以及目标 RCS 随方位角的分布已知时, 可以求解出该目标所对应的被检测概率, 其步骤如下.

利用雷达方程, 计算各方位角下 σ 所对应的信噪比 R_{sn} [7]:

$$R_{sn} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B F L R^4} \quad (5)$$

式中: P_t 为峰值功率; G 为天线增益; λ 为电磁波波长; k 为玻尔兹曼常数, 等于 1.38×10^{-23} J/K; T_0 为有效温度, 等于 290 K; B 为带宽; F 为噪声系数; L 为雷达损耗.

当虚警概率较小时, 各角度下的 σ 所对应的单脉冲雷达检测概率可由以下近似公式计算:

$$P_d = P_f^{1/(1+R_{sn})} \quad (6)$$

式中: P_f 为虚警概率. 将各方位角下求得的检测概率 P_d 相加求均值, 即为被雷达检测的平均概率 $\bar{P}_d$.

被雷达检测的平均概率最直接地反映了目标的隐身性能. 缺点是计算过程较复杂, 需获得探测雷达的虚警概率、带宽、噪声系数等诸多参数.

2.4 大于 σ_{cr} 的概率

通过 σ 与其对应的检测概率关系曲线可知: 当 σ 大于某一数值时, 其发现概率会迅速增加; 而当小于这一数值时, 发现概率变得极低. 因此, 可以根据该关系曲线确定一个适当的 σ , 当目标 σ 低于这个值时, 认为目标不易被发现; 当高于这个值时, 认为目标容易被发现. 把这个值称为 σ_{cr} . 目标在威胁区域内 σ 大于 σ_{cr} 的概率用 P_{cr} 表示, 即

$$P_{cr} = n(\sigma \geq \sigma_{cr}) / N \quad (7)$$

式中: $n(\sigma \geq \sigma_{cr})$ 为 σ 大于 σ_{cr} 的方位角个数. 目标的 P_{cr} 越小则表示该目标越难被雷达发现. P_{cr} 虽然不如 $\bar{P}_d$ 精确, 但与其相比计算过程大为简化, 且能较好反映出隐身设计中的轮廓平行原则. 缺点是 σ_{cr} 的确定有一定的主观性, 且最优解不一定唯一.

3 自适应遗传算法

对不同倾角下桅杆 RCS 分布情况进行简单预估, 结果显示这 4 种目标函数都是非凸且有多个局部最优解. 一般的数值优化方法很难保证优化到全局最优解, 故本文基于 Matlab 平台编写了自适应遗传算法作为桅杆雷达隐身寻优算法. 遗传算法建立于适者生存、优胜劣汰的生物进化机

制,具有良好的全局性、并行性和鲁棒性,非常适合用于解决多变量和多峰值的优化问题.

由于交叉概率和变异概率的选择是影响遗传算法行为和性能的关键,针对不同的优化问题,一般很难找到适应于每个问题的最佳值.为降低计算量,本文编写的遗传算法中交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 随适应度自动改变,计算公式如下:

$$P_c = \begin{cases} k_1(f_{\max} - f)/(f_{\max} - f_{\text{avg}}) & ; f > f_{\text{avg}} \\ k_2 & ; f \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3(f_{\max} - f)/(f_{\max} - f_{\text{avg}}) & ; f' > f_{\text{avg}} \\ k_4 & ; f' \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f_{\max}$ 为该代群体的最大适应度值; f_{avg} 为该代群体的平均适应度值; f 为要交叉的个体中较大的适应度值; f' 为变异个体的适应度值; k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 为常数,在本文中分别选为 0.5、0.9、0.02 和 0.05.

本文编写的遗传算法为轮盘赌选择,双节点交叉,多节点变异.由于在进行隐身优化时需要对舰船桅杆的几何尺寸进行约束,该遗传算法加入了修复策略,对每次生成的新基因链进行几何条件检测,对不可行的基因链进行修复使之可行.自适应遗传算法流程如图 1 所示.

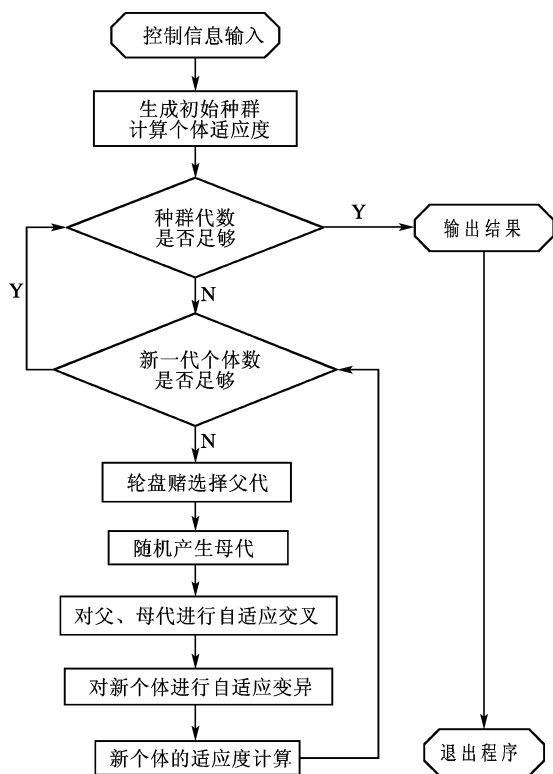


图 1 自适应遗传算法流程

Fig. 1 Adaptive genetic algorithms process

4 桅杆隐身优化算例

4.1 桅杆隐身优化几何模型

桅杆系统作为舰船一个重要的局部模块,其隐身优化设计属于局部形状优化设计,应在给定舰船桅杆外部拓扑构型的基础上确定具有较好雷达隐身性能的形状参数.本文采用英国 45 型驱逐舰桅杆作为桅杆拓扑构型,并进行相应简化,忽略桅杆上所安装的雷达天线等电子设备的影响,桅杆模型如图 2 所示.从外形上来看,该舰桅杆主体是全封闭结构,呈表面倾斜的八边形,且分别沿舰长和舰宽方向对称.桅杆主要几何参数如下:桅杆底部外轮廓尺寸为 $9\text{ m} \times 9\text{ m}$,桅杆高度为 17 m ,其他参数见图 3、4,单位为 mm .图中桅杆顶部的雷达基座只做说明,并不参与桅杆 RCS 的计算和外形设计.假设桅杆围壳结构为理想导体,桅杆内部电磁场强度为零,桅杆上所有围壳均近似为等厚度结构.

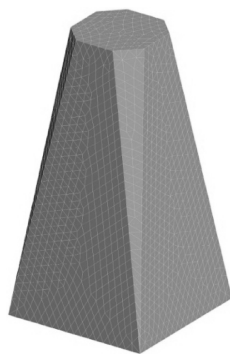


图 2 桅杆模型

Fig. 2 Mast model

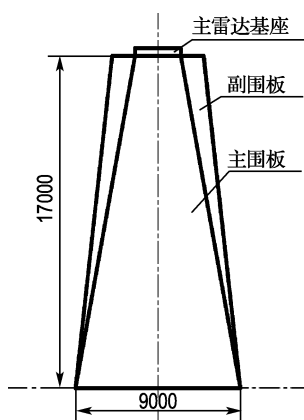


图 3 桅杆模型前视图

Fig. 3 Front view of mast model

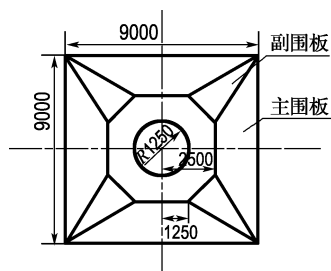


图4 桅杆模型上视图

Fig. 4 Top view of mast model

4.2 桅杆隐身优化数学模型

对桅杆进行外形雷达隐身优化,修改围板的倾角是较为简单和直接的方法.考虑到全向天线的布置,桅杆尽量保持八面体形状.由于桅杆的对称性,只需主、副围板倾角两个变量就可确定桅杆所有外形几何参数.同时根据几何关系,桅杆主围板倾角 τ 和副围板倾角 τ' 与图5中所示的顶部几何尺寸 α 和 β 存在如下对应关系:

$$\begin{cases} \tau = \arctan[(4.5 - \alpha)/17] \\ \tau' = \arctan[(9 - \alpha - \beta)/17\sqrt{2}] \end{cases} \quad (10)$$

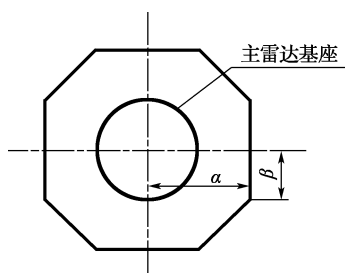


图5 桅杆顶部尺寸分布示意图

Fig. 5 Distribution diagram in the top of mast

可见只需确定 α 和 β 两个变量即可得到不同围板倾角所对应的桅杆模型.桅杆围板为内倾且顶部雷达机座的半径为 1.25 m,因此 α 的约束范围为 $1.25 \text{ m} \leq \alpha \leq 4.50 \text{ m}$.为保持桅杆的拓扑形状, β 应满足 $0 \leq \beta \leq \alpha$.因此为了更直接表示隐身优化的几何约束和桅杆优化后几何特征,选取 α 和 β 作为该桅杆隐身优化的自变量,此时该桅杆雷达隐身外形优化设计的数学模型可表述为

$$\begin{cases} \text{find} & \alpha, \beta \\ \min & \text{Objective} \\ \text{s. t.} & 1.25 \leq \alpha \leq 4.50 \\ & 0 \leq \beta \leq \alpha \end{cases} \quad (11)$$

式中: Objective 为桅杆隐身优化目标函数,分别

设为 $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\sigma}_{\max}$ 、 $\bar{P}_d$ 和 P_{cr} ,即 4 种 RCS 评价标准.

4.3 雷达系统及环境参数

舰船外形隐身设计的宗旨是使雷达威胁区域内舰船桅杆 RCS 远小于其他区域的 RCS.与飞行器不同,对于舰船,其威胁雷达波来自敌方舰船或空中武器平台,二者都接近水面,观察仰角限制在一个极小的范围内^[8],因此本文的隐身优化研究只针对水平来波展开.评估坐标系如图6所示, φ 为照射的水平方位角.由于桅杆模型沿横、纵剖面对称,在实际计算时 φ 的范围只需选取 $0^\circ \sim 90^\circ$ 即可.由于金属表面的镜面反射与极化无关,在考察桅杆隐身性能时不考虑极化的影响.

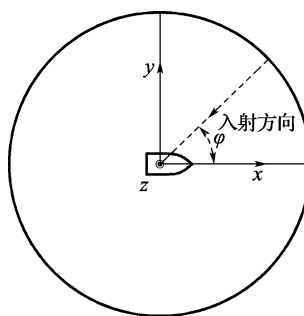


图6 入射方向示意图

Fig. 6 The incident direction scheme

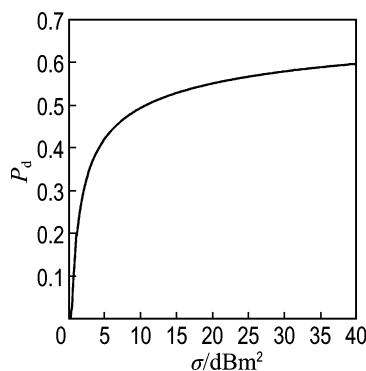
本文选取的探测雷达为单站单脉冲雷达,其性能参数如表1所示,虚警概率为 10^{-5} ,取舰船被探测距离 R 为 200 km.图7为该系列雷达参数下 σ 与目标被检测概率关系曲线.取 σ_{cr} 为 10 dBm^2 ,对应的发现概率约为 0.5.

表1 雷达性能参数

Tab. 1 Radar performance parameters

λ/m	B/MHz	P_t/kW	G/dB	F/dB	L/dB
0.33	0.3	1 000	50	2	2

舰船所处自然环境较为复杂,在实际作战中,波浪荷载或风荷载将使舰船产生横摇,同时海浪引起的海杂波易对雷达的探测产生影响^[9].地球曲率以及大气中的雾、雨滴也会使雷达发射的电磁波产生一定衰减^[10],这会导致预估 RCS 与实际探测的存在差别.在进行 RCS 优化时无法将所有复杂自然环境都考虑进去,因此只是选取了舰船最普遍的环境条件,即静止在海面这种工况进行了分析.

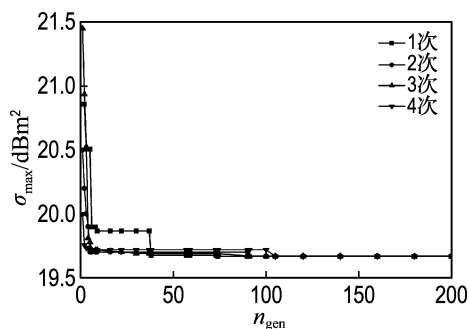
图7 检测概率与 σ 关系曲线Fig. 7 Relation curves of detection probability versus σ

4.4 桅杆隐身性能优化结果分析

在入射波长为 0.33 m、仰角 θ 为 0° 、水平极化(HH)的雷达波照射下,分别以 $\bar{\sigma}$ 、 $\sigma_{\max}$ 、 $\bar{P}_d$ 和 P_{cr} 作为目标函数进行桅杆雷达隐身优化,种群大小为 50,进化代数为 200.

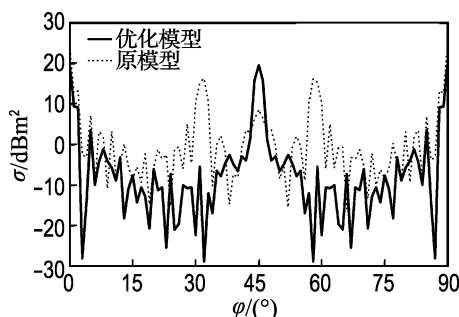
(1) $\sigma_{\max}$ 优化结果分析

以 $\sigma_{\max}$ 为目标函数时,对桅杆模型几何参数共进行了 4 次优化,图 8 所示为每次优化迭代过程中目标函数随迭代次数的变化.从图中可以看出,每次优化初始种群个体都是随机产生的,但优化过程都是收敛的,且最终都收敛到同一数值,可见本文编写的自适应遗传算法具有良好的鲁棒性,优化结果是可信的.

图8 以 $\sigma_{\max}$ 为目标函数的4次优化迭代Fig. 8 Four optimization iterations using $\sigma_{\max}$ as objective function

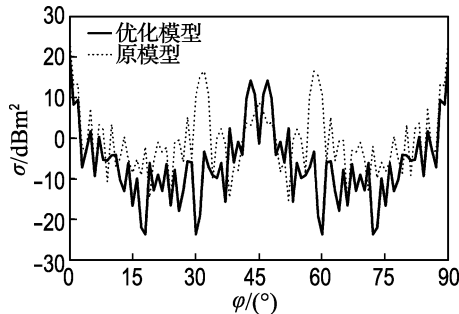
以 $\sigma_{\max}$ 为最优时 α 为 1.360 m, β 为 1.321 m, 即 $\alpha \approx \beta$, 桅杆模型的副围板几乎消失, 桅杆模型近似为四边形结构. 优化前后 σ 分布对比如图 9 所示, 可以看出, 优化后水平方位角 φ 为 45° 时桅杆 σ 最大, 为 19.667 dBm², 与原模型相比降低 5.094 dBm²; 在绝大多数方位角上 σ 有所降低; 在桅杆 2 个主特征方向(φ 为 0° 、 90°)上的 σ 亦有较大的降低; 2 个主围板所产生的副瓣融合为一起, 形

成一个新的较大波峰; 副瓣融合形成的 σ 峰值与特征方向上的 σ 峰值几乎相等.

图9 优化 $\sigma_{\max}$ 前后 σ 分布对比Fig. 9 σ Distribution comparison before and after $\sigma_{\max}$ optimization

(2) $\bar{\sigma}$ 优化结果分析

当以威胁区域内 $\bar{\sigma}$ 为目标函数时,最优方案为 $\alpha=1.358$ m 和 $\beta=1.141$ m. 优化前后 σ 分布结果对比如图 10 所示, 可以看出优化后, 桅杆模型在绝大多数方位角上 σ 有所降低, 主围板所产生的反射主瓣与副瓣夹角增大, 2 个主围板产生的副瓣靠拢在一起. 与 $\sigma_{\max}$ 优化结果不同, 2 个副瓣并没有完全融合, 而是在入射角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 形成一个较大的峰段.

图10 优化 $\bar{\sigma}$ 前后 σ 分布对比Fig. 10 σ Distribution comparison before and after $\bar{\sigma}$ optimization

(3) $\bar{P}_d$ 优化结果分析

当目标函数为被雷达检测平均概率 $\bar{P}_d$ 时,自变量为 $\alpha=1.250$ m 和 $\beta=1.246$ m 时桅杆模型为最优,此时桅杆模型副围板接近消失,且主围板顶部已达到几何约束的边界,与主雷达基座靠在一起.从图 11 可以看出,优化后在很大的入射角范围内 σ 都有较大的降低, σ 峰值的个数减少, 2 个副瓣融合为 1 个新的波峰, 但与 $\sigma_{\max}$ 最优方案相比峰段要窄. 其中在入射角为 $15^\circ \sim 37^\circ$ 以及 $53^\circ \sim 75^\circ$ 两个较大范围内 σ 变化相对平缓. 该结果符合

桅杆隐身设计的初衷,即桅杆在整个威胁区域内雷达回波的峰值控制在较窄的范围内,而其他方位角的 σ 较小,且变化平缓。

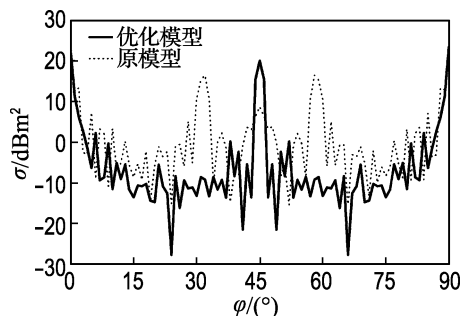


图 11 优化 $\bar{P}_d$ 前后 σ 分布对比

Fig. 11 σ Distribution comparison before and after $\bar{P}_d$ optimization

(4) P_{cr} 优化结果分析

以 P_{cr} 作为评价标准时,可能会出现不同的自变量对应相同的 P_{cr} ,即以 P_{cr} 为优化目标函数时,最优解不唯一.本文在这些最优解中选取 σ_{max} 最小和最大的2个具有代表性的解进行分析.这2个解分别为 $\alpha=1.352$ m, $\beta=1.348$ m 和 $\alpha=1.319$ m, $\beta=1.318$ m.这2个方案所对应的 α 与 β 几乎相等,即模型近似为四边形结构,副围板消失。

图12所示是这2个方案与原模型 σ 分布情况的对比.从图中可以看出,优化后2个桅杆方案在威胁区域内 σ 大于10 dBm²的区域得到有效的控制,只剩下2个特征方向以及 φ 为45°附近3个很窄的方位角内,波峰之间的 σ 相对较小,分布情况大致与 $\bar{P}_d$ 最优方案类似。

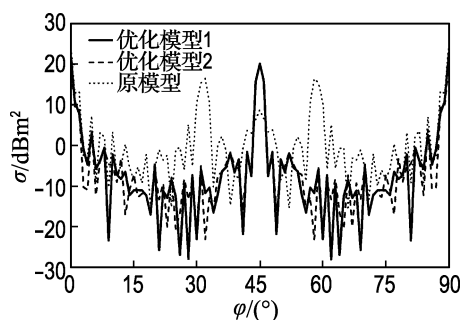


图 12 优化 P_{cr} 前后 σ 分布对比

Fig. 12 σ Distribution comparison before and after P_{cr} optimization

4.5 优化结果综合分析

4种目标函数优化的最终结果如表2所示,当以不同的评价标准作为桅杆雷达隐身目标函数

时,所得到的桅杆最优方案的几何参数和 σ 分布情况均不相同,但每种指标优化后与初始方案相比隐身性能都有较大的提高。

表 2 桅杆雷达隐身优化结果

Tab. 2 Calculation results of masts radar stealth optimization

模型 类型	α /m	β /m	σ_{max} / dBm ²	$\bar{\sigma}$ / dBm ²	$\bar{P}_d$	P_{cr}
原模型	2.500	1.250	24.761	9.585	0.179	0.389
σ_{max} 最优	1.360	1.321	19.667	7.320	0.190	0.152
$\bar{\sigma}$ 最优	1.358	1.141	20.133	5.871	0.221	0.174
$\bar{P}_d$ 最优	1.250	1.246	23.905	9.490	0.167	0.174
P_{cr} 最优	1.352	1.348	19.994	7.533	0.183	0.130
	1.319	1.318	22.801	8.906	0.190	0.130

其中,当分别以 σ_{max} 、 $\bar{P}_d$ 和 P_{cr} 为目标函数时,最优结果的桅杆顶部近似为四边形,副围板几乎消失,可见四边形桅杆在一定程度上比拓扑构型的八边形桅杆隐身性能更优.同时,这4种指标的优化方案 σ 分布相似,2个副瓣的峰值发生或接近融合,在水平方位角 φ 为45°左右处形成一个较大的波峰。

在进行隐身优化时,虽目标函数适应度值各不相同,且局部最优解较多,但自适应遗传算法较好地解决了这些问题,显示了很好的鲁棒性。

5 结 论

(1)4种评价指标的最优方案与原模型相比,在威胁区域内 σ 都有明显的降低,且这4种最优方案所对应的 σ 分布具有一定的相似性,可见这4种目标函数在进行桅杆隐身设计时都是可行的,只是评估 σ 的重点不同.当然4种评价标准在使用时都存在一定的适用范围,设计者可根据已有条件和需求,选取一种较为合适的评价标准或将4种评价标准加权,作为在实际舰船雷达隐身优化设计时的目标函数。

(2)无论何种目标函数优化后,桅杆在水平入射角 φ 为0°和90°两个特征角度方向依然保持较高的 σ 峰值, σ 分布变化主要发生在其他区域.可见只以特征角度对应的 σ 进行桅杆外形优化,对于改善桅杆的隐身性能是无效的.这些角度的强散射问题仅通过外形优化无法解决,必须结合隐身材料等其他手段解决。

(3)桅杆外形隐身优化设计必须与整舰外形隐身设计一同考虑,单独考虑桅杆进行外形隐身优化设计是难以符合实际要求的.此外,本文只针对桅

杆的隐身特性进行优化,在实际桅杆设计优化中,隐身优化应与桅杆内部设备布置、力学特性等优化相结合,这些内容将在进一步的研究工作中予以实现。

参考文献:

- [1] 张友益, 张殿友. 舰艇雷达波隐身技术研究综述[J]. 舰船电子对抗, 2007, **30**(2):5-11.
ZHANG You-yi, ZHANG Dian-you. Summary of stealth technology about radar wave in naval ship [J]. **Shipboard Electronic Countermeasure**, 2007, **30**(2):5-11. (in Chinese)
- [2] 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 Ming-yun, HUANG Min-jie, WU Zhe. Preliminary design and effect evaluation of enclosed stealth mast [J]. **Chinese Journal of Radio Science**, 2010, **25**(5):833-838. (in Chinese)
- [3] 杨德庆, 常少游. 舰艇外形雷达隐身优化设计理论与方法[J]. 舰船科学技术, 2006, **28**(3):42-47.
YANG De-qing, CHANG Shao-you. Theory and method for naval vessel shape optimal design considering the radar stealthy performance [J]. **Ship Science and Technology**, 2006, **28**(3):42-47. (in Chinese)
- [4] 谭云华, 周乐柱. 三维电大尺寸复杂群目标的单站 RCS 的快速多极子分析[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2004, **40**(5):823-829.
TAN Yun-hua, ZHOU Le-zhu. Using the fast multiple method to analyze monostatic RCS of electrically large 3-D multi-conducting bodies [J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis**, 2004, **40**(5):823-829. (in Chinese)
- [5] George T R, Donald E B, William D S. **Radar Cross Section Handbook** [M]. New York: Plenum Press, 1970:50-63.
- [6] 胡添元, 余雄庆. 目标函数的选择对雷达隐身优化设计的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, **10**(4):447-450.
HU Tian-yuan, YU Xiong-qing. Effect of objective function in optimization design on low observability [J]. **Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics**, 2008, **10**(4):447-450. (in Chinese)
- [7] Bassem R M. **Radar System Analysis and Design Using MATLAB** [M]. 2nd ed. London: Chapman and Hall, 2005:38-83.
- [8] 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 Yong-xin, LI Ming. Radar stealth techniques of surface warship [J]. **Shipboard Electronic Countermeasure**, 2009, **32**(2):35-37. (in Chinese)
- [9] Alan B, Bill D, Alan W. **Radar and ARPA Manual** [M]. 2nd ed. UK: Butterworth Heinemann, 2005:172-180.
- [10] Briggs J N. **Target Detection by Marine Radar** [M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004.

Radar stealth optimization analyses of closed-wide mast of warship

YANG Yang*, DU Xiao-jia, HONG Ming

(Department of Naval Architecture, Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: As an important source of radar reflection, mast will directly affect the stealth performance of overall warship, so stealth shape optimized design aiming at mast is very significant. Based on the typical radar detection conditions, an octagon closed-wide mast is taken as the stealth design model. Using the adaptive genetic algorithm, the mast is optimized with the objective functions which are respectively made by four existing criteria, including the maximum and average radar cross section (RCS) within the threat area, the average probability of radar detection and the probability greater than the critical RCS, and the comparative analyses of optimal mast design in every criterion are put forward. Every optimal mast design in every criterion has a better radar stealth performance, and the RCS distribution of each optimal design has a certain similarity. The experimental results also indicate that the optimization of the RCS of characteristic angle of mast is invalid.

Key words: warship mast; radar cross section; stealth; optimization; genetic algorithm