

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03911>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 唐斯密, 李铄镔, 宋汉江. 基于雷达回波特征显影技术的雷达吸波材料涂覆方法 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(4): 17-24.

TANG S M, LI X B, SONG H J. Study on coating of radar absorbing materials based on radar echo development[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(4): 17-24 (in Chinese).

# 基于雷达回波特征显影技术的 雷达吸波材料涂覆方法



扫码阅读全文

唐斯密\*, 李铄镔, 宋汉江

中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161

**摘要:** [目的] 为尽量控制涂覆雷达吸波材料对船舶带来的重心上移、成本以及维护保养工作量增加等负面影响, 提出一种基于雷达回波特征显影技术确定船体及设备重点涂覆区域的多目标优化设计策略。

[方法] 对某船舶进行成像分析, 利用本文提出的优化策略对船舶的雷达散射截面(RCS)和涂覆区域进行优化设计, 得到相关的 Pareto 和非 Pareto 解集, 并反演工程应用场景。[结果] 该方法可较为准确地确定重点涂覆区域, 仿真得到至少 10 个 Pareto 最优解(包括两极解)。利用 Pareto 解集对该船开展工程应用反演, 在涂覆的面积比小于 11% 的条件下, RCS 总平均值下降超过 53%。[结论] 验证了所提出方法的有效性, 对船舶目标的 RCS 控制具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 雷达波回波显影; 雷达吸波材料; 多目标优化; 雷达散射截面(RCS)

中图分类号: U665.22

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03911

## 0 引言

船舶雷达散射截面(radar cross section, RCS)控制具有重要的应用价值<sup>[1-4]</sup>, 其主要技术手段是通过调整上层建筑及设备的外形表面和边缘, 使电磁波向除了敌方雷达接收方向之外的其他方向反射和折射, 同时尽量减弱上层建筑和设备等之间的耦合<sup>[5-8]</sup>, 但是在全周向范围内, 并非所有观测角度都能使目标向其他方向反射电磁能量。因此, 工程应用上, 当外形设计固化后, 若需进一步控制 RCS, 一般会采用涂覆吸波材料的方法<sup>[9-10]</sup>。吸波材料涂敷于船舶上层建筑及舾装设备的表面, 将辐射至船舶表面的雷达波进行损耗, 可全方位地降低雷达回波强度, 尤其是当外形设计受到限制时, 雷达吸波材料的应用可进一步缩小目标 RCS。随着海面目标 RCS 控制技术越发受到重视, 雷达波吸波材料也逐步得到推广应用<sup>[11-12]</sup>。

吸波材料的涂覆面积直接影响着 RCS 的控制效果, 若需要最大限度降低 RCS, 则要采用全部区域涂覆的方法, 但会带来经费以及质量增加等负面因素。如果采取部分涂覆的方法, 则很难

确定涂覆区域, 一旦涂覆区域有偏差, 将大幅降低吸波材料的应用效果。因此, 物体部分表面涂覆吸波材料控制 RCS 的技术一直是优化设计难点, 也是众多研究者关心的问题。李莎莎<sup>[13]</sup>采用目标的一维距离像, 判断目标的强散射源位置, 进行局部涂覆来改变目标的散射特性。Jiang 等<sup>[14]</sup>提出一种基于多级矩阵分解的目标 RCS 算法, 可有效地分析涂敷目标的电磁特性。He 等<sup>[15]</sup>将有限元边界积分与快速多极相结合, 提出了研究涂敷目标电磁特性的新算法。徐涛<sup>[16]</sup>提出了一种可简化计算复杂度的加速求解涂覆目标的电磁特性方法。

上述方法对于吸波材料的优化涂覆有较强的指导性, 但由于船舶类目标通常具有电尺寸大、散射源多、耦合散射强等特点, 上述研究仍面临复杂模型的耦合散射和强散射区域难以量化识别、优化过程中交互性设计不友好, 以及电大尺寸目标计算过程复杂等问题。因此, 本文将基于雷达波回波显影技术对强散射区域量化分类, 以更好地控制工程计算量, 并利用图形化结果指导船舶低 RCS 设计, 以增强工程的交互性和

收稿日期: 2024-05-06

修回日期: 2024-07-05

网络首发时间: 2025-07-15 11:19

作者简介: 唐斯密, 男, 1980 年生, 博士

李铄镔, 男, 1989 年生, 硕士

\*通信作者: 唐斯密

指导性。

## 1 RCS 基本理论及计算方法

RCS 的定义基于平面波照射下目标各向同性散射。入射平面波的平均能量密度矢量大小为

$$w_i = \frac{1}{2} |\mathbf{E}^i \times \mathbf{H}^i| = \frac{1}{2Z_0} |\mathbf{E}^i|^2 \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{E}^i$  和  $\mathbf{H}^i$  分别代表入射电场强度和入射磁场强度;  $Z_0$  为自由空间的波阻抗,  $Z_0=377 \Omega$ 。

因此 RCS 为  $\sigma$  的目标能够截获的功率为

$$P = \sigma w_i = \frac{1}{2Z_0} \sigma |\mathbf{E}^i|^2 \quad (2)$$

如果这些辐射至目标的电磁场散射功率各向同性,则在  $R$  远距离处的散射功率密度为

$$w_s = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{\sigma |\mathbf{E}^i|^2}{8\pi Z_0 R^2} \quad (3)$$

上式也可用散射场表示:

$$w_s = \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{2Z_0} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{E}^s$  为散射电场强度。

由式(2)和式(3)可得到目标 RCS:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} \quad (5)$$

目前计算 RCS 的主流方法有理论计算方法和数值仿真方法。

1) 理论计算方法。主要有解析法和高频近似法两大类。其中:解析法是基于麦克斯韦方程组的精确解,通过几何光学法(GO)、物理光学法(PO)等直接推导 RCS 公式,多用于规则形状目标;高频近似法中的几何绕射理论(GTD)和物理绕射理论(PTD)分别通过引入绕射系数修正几何光学的局限性以及结合 PO 和绕射场修正等手段,解决飞机、船舶等大型目标 RCS 快速估算的问题。

2) 数值仿真方法。主要有矩量法(MoM)、时域有限差分法(FDTD)、有限元法(FEM)和多层快速多极子方法(MLFMM)。其中:MoM 是将目标表面电流离散化,通过积分求解散射场,适用于电小尺寸目标;FDTD 是通过时域麦克斯韦方程组的离散化,模拟电磁波与目标的相互作用,适用于多频段 RCS 分析,且适合复杂目标仿真;FEM 是通过网格划分求解偏微分方程组,适用于非均匀材料和多物理场耦合分析;MLFMM 是通过分层加速算法降低 MoM 的计算复杂程度,适合电大目标尺寸。

## 2 CST 微波工作室及回波显影技术

CST 微波工作室是一个快速而准确的通用高频三维电磁场仿真软件,善于计算时域及电大尺寸、复杂结构和宽带问题。它包含时域、频域和本征模 3 个求解器,其中时域求解器是 CST 的主流模块,它采用时域有限积分法(finite integration technique, FIT)对空间网格进行离散,只需运行一次就可以得到结构的宽带特性,一般对带有激励源的以及开域和电大尺寸问题都十分有效。常用的目标 RCS 计算或评估方法为单站收发装置,因此对于每个入射的平面波,接收装置在原入射方向上接收回波信号, CST 的 hotspots 计算通常被称为回波显影技术,其可对雷达波的入射方向上目标的回波强度进行量化分析,并以图形及灰度的形式显示。其原理是基于被辐射物体表面的散射强度,重构和分析物体不同表面对 RCS 贡献的程度,并以能量密度的形式表现出来,在周向  $90^\circ$  方位角下,某船舶的模型图和回波显影图分别如图 1(a)和图 1(b)所示。

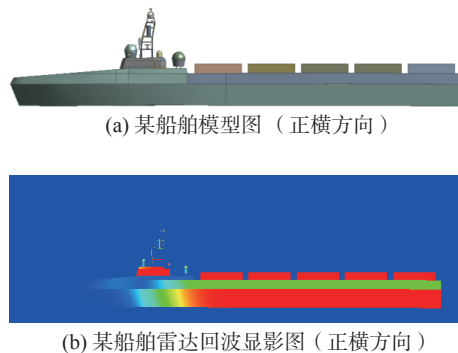


图 1 基于 CST 的雷达波回波显影技术

Fig. 1 Radar echo imaging technology based on CST

$90^\circ$  方位角下,驾驶室侧面、集装箱侧面以及船体靠下后半部分为 RCS 的主要贡献部位,由回波显影图可知,其回波能量密度远超其他部分,主要是因为这些区域在正横方向垂直或近似垂直,符合 RCS 基本理论。通过以上对比可以得知:在某方位角下, CST 的雷达回波显影技术可以比较精准地反映雷达波回波高能量区域,对后续吸波材料涂覆区域的确定可以起到较好的辅助作用。

## 3 优化流程及仿真

### 3.1 优化流程设计

本文所研究的船舶外表面材料涂覆面积与 RCS 控制存在明显的矛盾。若要控制涂覆面积,则 RCS 的控制效果会减弱;若想达到最好的 RCS 控制效果,则需要对所有表面积进行涂覆。因

此, 该问题属于典型的多目标优化问题。所谓多目标优化, 是指在满足给定约束条件的前提下, 在多个设计变量中找一系列平衡点, 使得多个目标处于协调优化中。虽然不能使所有目标同时达到最优, 但一个目标性能的改善, 往往不会影响其他目标的性能。在单目标优化问题中, 任何两个解都可以比较, 因而最终可以得到其最优解。但是对于多目标优化问题, 任何两个解不一定都可以比较出其优劣, 因此, 无法得到最优解, 只能得到 Pareto 最优解(或称非劣解, 有效解)。

针对一般的极小值问题 $\min(f_i(X))$ , Pareto 最优解的定义为: 在设计变量的取值范围内, 对于设计变量组 $X^*$ , 当且仅当不存在其他的设计变量组 $X$ , 在不违背约束的条件下满足: 1)  $f_i(X) \leq f_i(X^*)$ ; 2) 至少有一个 $X$ 使 $f_i(X) < f_i(X^*)$ , 则设计变量组 $X^*$ 为 Pareto 最优解。

对于一个多目标优化问题, 其常常具有很多个 Pareto 解, 所有 Pareto 解所组成的集合称为关于目标函数和约束集的 Pareto 最优解集, 而该解集中任何一个解都是可能的最优解。由 Pareto 解的定义可知, 在可行解集中没有比 Pareto 解更优的解。

本文基于涂覆面积与 RCS 控制效果的 Pareto 最优解提出优化设计策略, 主要思路如下:

- 1) 设置船舶 RCS 值和涂覆面积比为优化目标;
- 2) 在周向 360°方位角下仿真分析无涂覆材料及全涂覆材料(水线以上部分全部涂覆吸波材料)的 RCS, 分别为 $R_0$ 和 $R_1$ , 代表涂覆面积比为 0 和 100%(水平方位角下)时的船舶 RCS 值, 为 Pareto 解集中的两极非劣解;
- 3) 对无涂覆材料状态下的周向 RCS 值进行分析, 设周向分布的最大 RCS 值为 $R_{\max}$ , 并且为防止一次性提取样本太多而导致计算量过大, 本文采用 1/2 的方法分阶段提取样本, 一旦计算超量, 可根据需要直接跳出循环开展优化, 因此将周向 RCS 值按照 $[R_{\max}/2, R_{\max}]$ 归类, 提取该角度下的回波显影图像集;
- 4) 根据显影结果, 以面积和回波能量密度为评估依据, 利用非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm, NSGA)对涂覆区域进行确定;
- 5) 评估涂覆的结果, 可以得到一组 Pareto 和非 Pareto 解集;
- 6) 第 2 次, 将周向 RCS 值按照 $[R_{\max}/2^2, R_{\max}]$ 归类, 重复第 4 步, 直至 $R_{\max}/2^n < R_1$ ;
- 7) 另外加上 $R_0$ 和 $R_1$ , 可得到 Pareto 和非 Pareto 解集;

8) 最后, 将解集对应的涂覆区域作为 Pareto 涂覆区域集进行工程反演, 得到具体需要涂覆的区域。

根据 NSGA, 优化程序在执行选择操作前, 群体根据支配与非支配关系来排序: 所有非支配个体被归为一类, 这些被分级的个体共享它们的虚拟适应度值。然后, 忽略这组已分级的个体, 对种群中的其他个体按照支配与非支配关系再进行分级, 该过程持续至群体中的所有个体被分级。在 NSGA 中, 对每个局部的 Pareto 曲面(线)上的所有个体分别采用适应度共享策略, 有利于保持群体多样性, 可以克服超级个体的过度繁殖, 防止早熟收敛。算法根据适应度共享对虚拟适应度值进行重新指定, 可使虚拟适应度值规范化, 并且使优良个体的适应度值保持优势, 可以有更多的复制机会, 同时也维持了种群的多样性。

优化设计流程如图 2 所示。

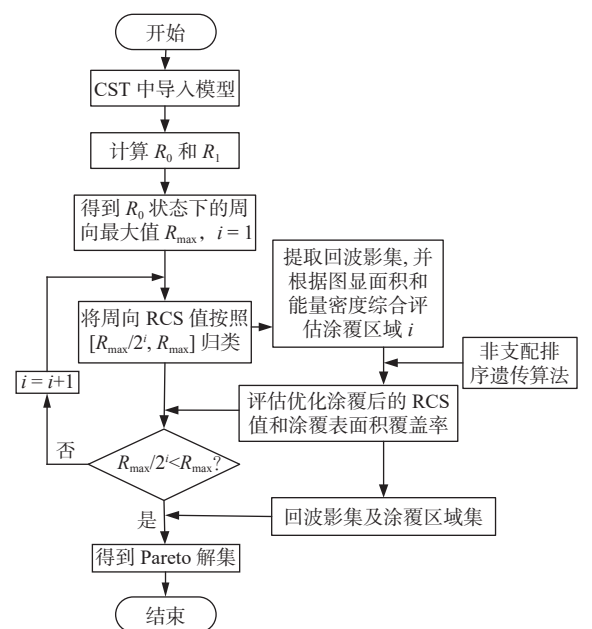


图 2 优化设计流程  
Fig. 2 Optimization design flowchart

### 3.2 基于优化流程的涂覆效果仿真分析

在 CST 中以某船舶为参照物建立的三维船舶模型长 50 m、宽 10 m、高 15 m, 如图 3 所示。设置探测雷达照射为平面波, 频率为 10 GHz, 水平极化, 计算周向 360°范围内 RCS 值, 角度间隔 1°。由于海水具有导电性, 通常认为电磁波穿透海面的能力非常弱, 且水线以下的船舶结构对船舶总体 RCS 贡献率占比很小, 因此水面目标的 RCS 仿真通常只考虑水线以上部分。

设吸波材料在 X 波段的吸波性能约为 10 dB, 经计算该船舶在无吸波材料和全涂覆吸波材料的

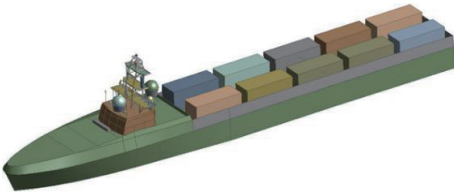


图 3 船舶模型

Fig. 3 The model of a ship

情况下, RCS 总平均值分别为  $554\text{ m}^2$  和  $54.6\text{ m}^2$ (根据相关标准, 数据处理过程中去除首尾及正横 4 个角度下的  $\pm 4.5^\circ$  区域 RCS 值, 以下同), 周向  $360^\circ$  的 RCS 值如图 4 所示。

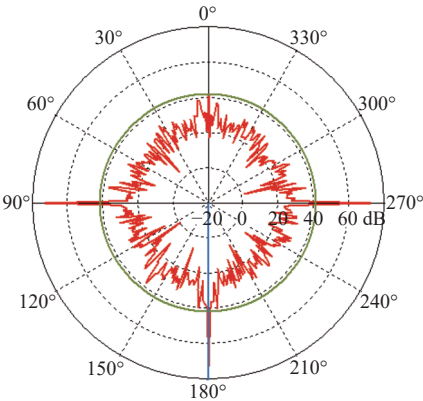


图 4 RCS 周向分布图

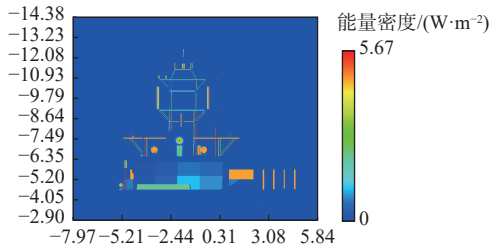
Fig. 4 Circumferential distribution diagram of RCS

其中, 周向 RCS 最大值为  $9\,430\text{ m}^2$ 。根据优化策略, 首先筛选出周向 RCS 值大于  $4\,715\text{ m}^2$  的方位角和回波影像图(考虑到船舶结构大致对称性, 且部分非对称结构为非强散射源, 为简化计算流程, 仅选择  $0^\circ\sim 180^\circ$  范围方位角下开展设计, 吸波材料涂覆区域对称)。其中, 当方位角为  $5^\circ, 6^\circ, 81^\circ, 142^\circ$  和  $175^\circ$  时 RCS 值分别为  $6\,066, 7\,016, 5\,430, 5\,462$  和  $9\,430\text{ m}^2$ , 影像图如图 5 所示。

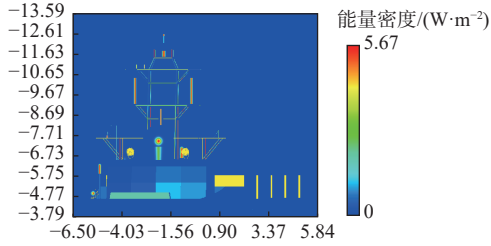
在  $5^\circ$  方位角下, 构成船舶强散射目标特性的主要有上层桅杆及附属物、前挡板、集装箱正对方向的外露部分以及驾驶室部分表面。且雷达回波能量密度最高的为桅杆部分圆柱体结构和桅杆结构平板的垂直面。

在  $6^\circ$  方位角下的成像与  $5^\circ$  方位角下的类似, 雷达回波能量密度最高的为桅杆部分圆柱体结构和桅杆结构板垂直面, 但集装箱正面外露部分回波能量密度较  $5^\circ$  方位角下的回波影响稍弱。

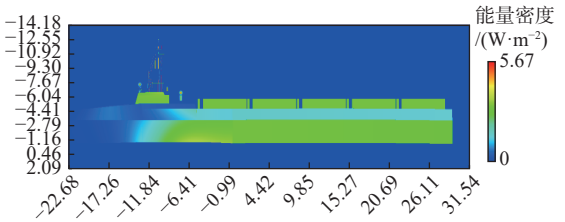
在  $81^\circ$  方位角下, 构成船舶强散射目标特性的主要有上层桅杆及附属物、侧面及部分正对方向的外露部分、船体侧面以及驾驶室侧面。雷达回波能量密度最高的仍为桅杆部分圆柱体结构, 虽然船体及集装箱侧面占据了大部分表面, 但回波能量密度稍低。



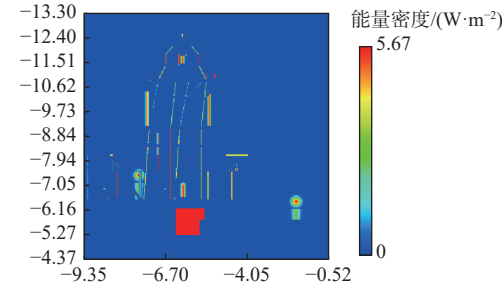
(a) 天顶入射角  $90^\circ$ , 水平入射角  $5^\circ$ , 水平极化



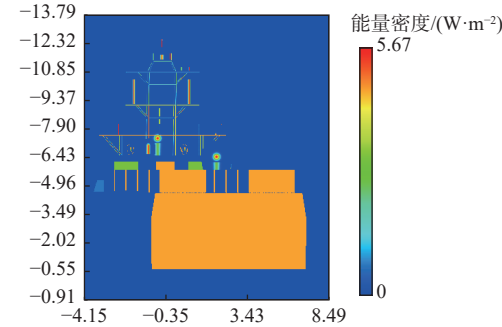
(b) 天顶入射角  $90^\circ$ , 水平入射角  $6^\circ$ , 水平极化



(c) 天顶入射角  $90^\circ$ , 水平入射角  $81^\circ$ , 水平极化



(d) 天顶入射角  $90^\circ$ , 水平入射角  $142^\circ$ , 水平极化



(e) 天顶入射角  $90^\circ$ , 水平入射角  $175^\circ$ , 水平极化

图 5 不同入射角下的雷达回波影像图

Fig. 5 Radar echo images at different incident angles

在  $142^\circ$  方位角下, 构成船舶强散射目标特性的主要有上层桅杆及附属物、驾驶室背面外露部分。雷达回波能量密度最高的为桅杆部分圆柱体结构和驾驶室背面, 船体的其他部分基本没有回波。

在  $175^\circ$  方位角下, 构成船舶强散射目标特性的主要有上层桅杆及附属物、集装箱背面外露部分以及船体背面。雷达回波能量密度最高的仍为

桅杆部分圆柱体结构,造成该现象的原因主要是桅杆结构件的近似垂直面以及结构件之间的耦合散射。驾驶室背面外露部分也有较大面积的回波,但总体能量密度较低,且周向相对角度较窄。

由第 1 轮的初步分析可知,当船舶处于高散射角度(方位角为 5°, 6°, 81°, 142°和 175°)时,桅杆及附属物由于始终处于可视状态,而其他部分出现的频率较低,虽然占有较大面积(如船体及集装箱背部、船体侧面等),但其回波能量密度较低,且占据强散射角度较少,因此总体贡献率较桅杆低。根据图 5 所示,回波能量密度最高值约为  $5.677\times10^5$ , 对其归一化处理(设  $h_{\text{hot}}$  为归一化相对回波能量密度,介于 0 和 1 之间),将  $h_{\text{hot}}$  作为设计变量引入优化计算中,设归一化后相对回波能量大于  $h_{\text{hot}}$  的部分涂覆吸波材料,涂覆材料后的初步模型采用 NSGA 进行分析。

经过第 1 轮优化后,可得到第 1 轮的 Pareto 解集初选,然后根据图 2 优化设计框架,开展第 2 轮的优化设计,直至满足图 2 的优化设计溢出条件:根据优化流程,继续搜索周向 RCS 最大值大于 2 358 m<sup>2</sup> 的方位角,提取该方位角对应的回波影像图,直至周向 RCS 大于 54.6 m<sup>2</sup> 角度下的影像被全部收集,得到了分析 Pareto 最优解的所有影像集,设置周向总平均 RCS 和涂覆面积比最小为优化目标,以影像集的能量密度阈值  $h_{\text{hot}}$  以及阈值以上面积  $S$  为涂覆区域的二级变量。本文中,优化程序循环了 5 次(溢出条件为 8 次,但由于后期计算工作量非常大,保存了前 5 次的计算结果作为优化样本),其中样本图像共有 71 幅。在提取影像图中的散射面后,开展表面积涂覆比(涂覆面积与水平方位角下可视部分总面积之比)和 RCS 综合评估,得到一组 Pareto 和非 Pareto 混合解集,如图 6 和表 1 所示。

在解算过程中会产生非 Pareto 解,图 6 是 Pareto

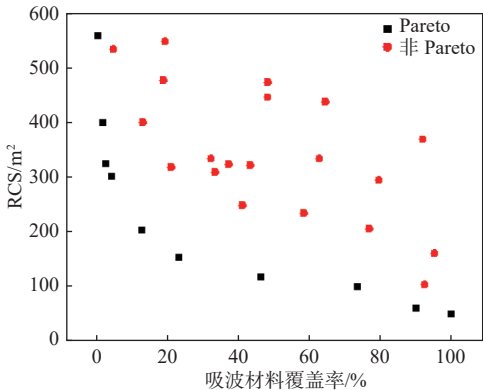


图 6 某船舶模型 RCS 和涂覆面积比 Pareto 和非 Pareto 解集

Fig. 6 The Pareto and non-Pareto solution set of RCS and coating area ratio

表 1 Pareto 解集

Table 1 The Pareto solution set

| 序号 | 面积比/% | RCS/m <sup>2</sup> |
|----|-------|--------------------|
| 1  | 0.0   | 554.0              |
| 2  | 1.3   | 399.0              |
| 3  | 2.2   | 326.0              |
| 4  | 3.7   | 302.0              |
| 5  | 12.5  | 205.0              |
| 6  | 23.0  | 155.0              |
| 7  | 46.0  | 121.0              |
| 8  | 73.5  | 103.2              |
| 9  | 90.0  | 64.3               |
| 10 | 100.0 | 54.6               |

和非 Pareto 解集的混合解,表 1 将 Pareto 解单独列出。从图 6 可知,最外围的黑体方块为 Pareto 解集(包括两级解在内一共有 10 个 Pareto 解),而红色原点为系统解算时衍生出的非 Pareto 解,根据相关定义及工程经验,黑体方块满足多目标优化解定义。由于设计的样本有限,因此解算的 Pareto 解集处于非连续状态,但外围轮廓大致清晰,可满足工程设计需求,其中 Pareto 解集对应的阈值大于  $h_{\text{hot}}$  部分为需要涂覆的区域,列为 Pareto 影像集。

由 Pareto 集的大致轮廓可知,当涂覆区域大于 20% 以后,随着涂覆面积的增加,RCS 缩减效果趋于平缓,如果不能应用大面积的吸波材料,则推荐在关键部位涂覆约为 20% 的吸波材料,可获取超过 70% 的 RCS 缩减效果。如果 RCS 控制效果需要达到 80% 以上,则吸波材料的涂覆面积比将超过 85%。可见,在关键区域涂覆吸波材料之后,如果需要进一步对 RCS 进行缩减,涂覆吸波材料的性价比将大打折扣。

3.3 吸波材料涂覆区域工程应用反演

根据 Pareto 和非 Pareto 最优解集,可以得出 RCS 控制量及涂覆区域的面积大小,但根据图 6 还无法确定需要涂覆的具体区域,因此,根据推演的 Pareto 和非 Pareto 解集及对应的影像集,反向提取对应的影像集中能量密度阈值  $h_{\text{hot}}$  和阈值以上面积  $S$  为设计变量,得到具体所需的涂覆区域。

工程反演设计目标为将该船舶 RCS 降低 50% 以上,且涂覆面积比不超过 15%。根据得到的解集,至少有 1 个工程参考方案: RCS 为 205 m<sup>2</sup>,涂覆面积比为 12.5%, Pareto 解的具体位置为驾驶舱上层的桅杆和附属设备以及前、后 4 个集装箱的水平可视部分(图 7)。考虑到不能影响船舶通

信以及射频设备的功能等因素,仅对金属部分进行涂覆,桅杆及附属装置被涂覆的具体结构为:桅杆圆柱体、桅杆结构板的垂直面、射频设备的支撑杆以及照明灯后壳部分。经评估,吸波材料涂覆的面积比为 10.9%,在以上区域涂覆吸波材料,经计算最终的 RCS 总平均值为  $259\text{ m}^2$ ,满足降低 50% 以上的设计要求。吸波材料涂覆后的船舶 RCS 周向散射图如图 8 所示。

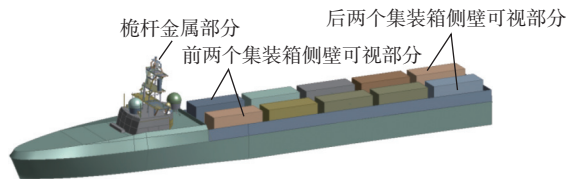


图 7 吸波材料涂覆区域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the absorbing material coating area

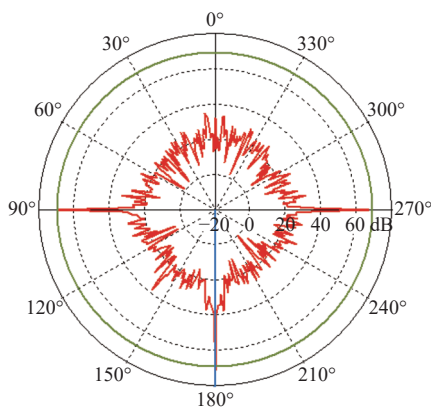


图 8 采用 Pareto 解后的船舶 RCS 周向散射图

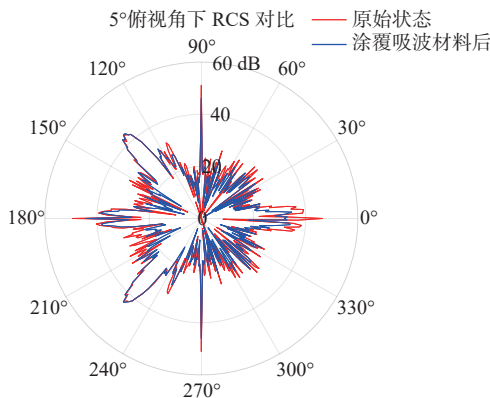
Fig. 8 Circumferential scattering diagram of ship RCS after adopting the Pareto solution

涂覆吸波材料前、后,船舶 RCS 总体缩减了约 3 dB,且在船舶的首尾和正横方向也有 3~10 dB 的缩减效果,尤其是船首 0°方向,RCS 从原来的 41.6 dB 缩减至 31.8 dB,也充分说明了主要回波能量集中在桅杆部分,控制桅杆部分的散射是该模型 RCS 控制的关键组成部分。在工程反演过程中,考虑到桅杆上部分设备无法涂覆吸波材料(如射频设备、照明灯以及通信设备),因此导致工程反演的效果与原优化设计的 Pareto 解存在一定的偏差,但工程设计结果仍实现了优化设计的目标。

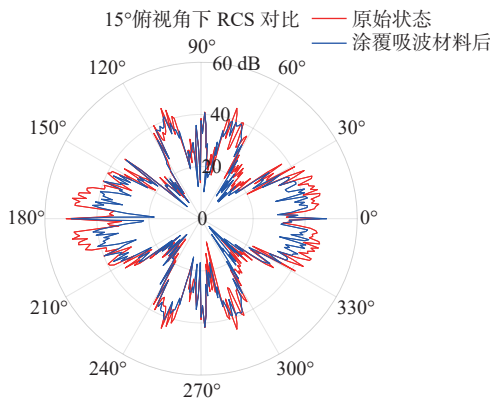
### 3.4 涂覆吸波材料前、后俯视角下的船舶 RCS 评估

虽然水面目标的 RCS 主要针对水平方向开展评估和测试,但来自空中的威胁也不能忽视。空中探测平台由于具有一定的飞行高度,对海面目标的探测会形成一定的俯视角。本节对吸波材料涂覆后所具备的俯视角下 RCS 缩减效果进一

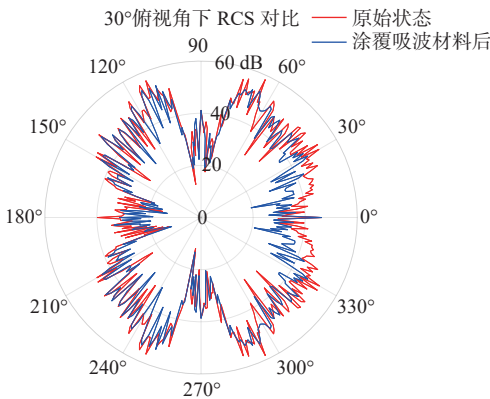
步开展分析,以评估其对空中探测平台的 RCS 控制效果。设空中探测平台探测波段为 X 波段,取中心频率 10 GHz 作为仿真输入,俯视角分别取 5°,15°和 30°。涂覆吸波材料前后 RCS 周向图如图 9 所示。



(a) 5°俯视角下船舶 RCS 周向散射图



(b) 15°俯视角下船舶 RCS 周向散射图



(c) 30°俯视角下船舶 RCS 周向散射图

图 9 不同俯视角下的 RCS 对比

Fig. 9 Comparison of RCS at different depression angles

涂覆吸波材料后的船舶 RCS 在不同的俯视角下仍然有较好的缩减效果: 5°俯视角下, RCS 由  $2\,446.7\text{ m}^2$ (由于产生了较大的俯视角,原用于评估船舶 RCS 的相关标准已不适用,此处的 RCS 采用全周向总平均值)缩减至  $1\,343.3\text{ m}^2$ ,缩减效果为 45.1%; 15°俯视角下, RCS 由  $8\,845.8\text{ m}^2$  缩减至  $3\,498.1\text{ m}^2$ ,缩减效果为 60.5%; 30°俯视角下,

RCS 由  $4\,592.7\text{ m}^2$  缩减至  $2\,840.8\text{ m}^2$ , 缩减效果为 38.1%。虽然本文的吸波材料涂覆主要针对水平方位角 RCS, 但针对俯视角(空中平台探测), 仍然具有较好的控制效果。

4 结 语

本文针对海上目标的 RCS 控制要求与吸波材料涂覆面积相矛盾的问题, 提出利用 CST 的回波显影技术确定吸波材料的涂覆区域, 建立了雷达吸波材料在表面涂覆部位的优化设计方法。其中, 以能量密度阈值  $h_{\text{hot}}$  和阈值以上面积  $S$  为设计变量, 采用非支配排序遗传算法开展多目标优化设计, 从而得到 Pareto 解集。以某船舶模型为例, 实现 RCS 控制效果与吸波材料涂覆比例的优化设计, 取得了较好的优化效果, 这对指导船舶的吸波材料涂覆具有一定的工程应用价值。由于 Pareto 解为非连续解, 因此在部分工程应用上, 可能还无法从解集中直接找到工程应用解。此外, 由于仿真模型进行了部分理想化设计, 需要根据工程设计经验和船舶的实际装置进一步判断。但是总体而言, 本文提出的方法仍然可以大致判断出涂覆吸波材料的关键部位, 并为工程应用提供技术指导。

参考文献:

[1] ESTBAN S, et al. Active control of hydrofoils for stealth ship design[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 280: 114532.

[2] DENG R, et al. Computational analysis of radar-absorbing materials on warships[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2023, 65(4): 1203-1212.

[3] JAVAD M, et al. Nonlinear control strategies for RCS minimization in planing crafts[J]. *Applied Ocean Research*, 2025, 124: 103198

[4] KNOTT E F, SHAEFFER J F, TULEY M T. Radar cross section[M]. 2nd ed. Boston: Artech Housing Inc. , 1993.

[5] 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 X J, CUI M. Stealth evaluation and improvement of mast configuration in the preliminary design stage[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(2): 127-132 (in both Chinese and English).

[6] 杜晓佳, 李鹏, 倪家正, 等. 运动状态下舰船本体 X 波段 RCS 统计特征分析 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(1): 163-169.

DU X J, LI P, NI J Z, et al. Analysis of X-band RCS statistical characteristics of ship body in motion state[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(1): 163-169 (in Chinese).

[7] 钱治强. 关于水面舰艇雷达波隐身技术发展思考 [J]. *舰*

*船科学技术*, 2011, 33(增刊 1): 22-25.

QIAN Z Q. Research on the warship radar stealth technologies development trend[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(Suup1): 22-25 (in Chinese).

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

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

[9] 庄海燕, 于海涛, 陈凯锋, 等. 雷达波隐身涂层设计对电性能的影响研究 [J]. *材料开发与应用*, 2011, 26(1): 11-14,18.

ZHUANG H Y, YU H T, CHEN K F, et al. The impact of the design on electrical performance of radar wave stealth coatings[J]. *Development and Application of Materials*, 2011, 26(1): 11-14,18 (in Chinese).

[10] 徐剑盛, 周万城, 罗发, 等. 雷达波隐身技术及雷达吸波材料研究进展 [J]. *材料导报*, 2014, 28(9): 46-49.

XU J S, ZHOU W C, LUO F, et al. Research progress on radar stealth technique and radar absorbing materials[J]. *Materials Review*, 2014, 28(9): 46-49 (in Chinese).

[11] 秦远田, 孙汗青, 岳鑫. 涂敷雷达吸波材料对战机电磁隐身性能的影响 [J]. *微波学报*, 2021, 37(S1): 249-252.

QIN Y T, SUN H Q, YUE X. Effect of coated radar absorbing materials on the electromagnetic stealth performance of warplanes[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(S1): 249-252 (in Chinese).

[12] 张磊, 李永清, 王静南, 等. 雷达隐身复合材料研究进展及在舰船上的应用 [J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(2): 144-149.

ZHANG L, LI Y Q, WANG J N, et al. The research and application of radar wave stealth composites for warship [J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(2): 144-149 (in Chinese).

[13] 李莎莎. 基于吸波材料的隐身目标散射特性分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

LI S S. Study on scattering characteristics of stealth targets based on absorbing materials[D]. Xi'an: Xidian University, 2021 (in Chinese).

[14] JIANG Z N, HUANG S C, WANG Z X, et al. Efficient analysis of coated object using fast algorithm with surface impedance boundary condition[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, 63(3): 521-528.

[15] HE H J, GUO L X. Efficient hybrid method for electromagnetic scattering from a coated object above a two-layered rough surface[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(25): 7102-7108.

[16] 徐涛. 基于高阶阻抗边界条件的涂敷目标电磁散射分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

XU T. The analysis of electromagnetic scattering of coated object based on high-order impedance boundary condition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016 (in Chinese).

# Study on coating of radar absorbing materials based on radar echo development

TANG Simi\*, LI Xianbin, SONG Hanjiang

Unit 92942 of PLA, Beijing 100161, China

**Abstract:** [ **Objective** ] To mitigate the negative effects of coating radar absorbing materials on ships, such as a shift in the center of gravity, increased cost and higher maintenance workload, a multi-objective optimization design strategy based on radar echo feature development technology is proposed. This approach aims to identify the key coating areas on both the ship and its equipment. [ **Method** ] The proposed optimization strategy is applied to radar imaging analysis of a ship to optimize its Radar Cross Section (RCS) and coating area. Pareto and non-Pareto solution sets are generated, and engineering application scenarios are inferred through inverse modeling. [ **Results** ] The results show that the proposed method can accurately determine the key coating areas. Simulations yielded at least 10 Pareto optimal solutions, including bipolar solutions. When applying inverse engineering based on the Pareto solution, the ship’s total average RCS decreases by more than 53% with a coating area ration of less than 11%. [ **Conclusion** ] Simulation results show that the proposed method is effective and offers significant engineering value for RCS control of ship targets.

**Key words:** radar echo development; radar absorbing materials; multi-objective optimization; radar cross section

## 相关论文

[1] 李若笛, 万国宾, 魏梓晗, 等. 一种新型宽带低剖面多层复合吸波体设计 [J]. 中国舰船研究. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04344>

[2] 侯牡玉, 弓树宏, 肖东海, 等. 基于 Bagging-GPR 的舰船目标 RCS 频率外推技术 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 103–110. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03147>

[3] 杜晓佳, 廖章奇, 李哲, 等. 掠入射下舰船运动对本体雷达散射截面积概率密度的影响 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 211–217. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02436>

[4] 莫熠, 奚秀娟, 陈亮, 等. 频选天线罩对阵列天线波束扫描特性影响分析 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2): 31–35. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01707>