

DOI:10.19423/j.cnki.31-1561/u.2018.05.144

# 关于雷达上舰电磁兼容性问题的讨论

陈晨 赵齐民 李光所

(中国船舶及海洋工程设计研究院 上海 200011)

[摘要] 作为舰船电磁兼容设计师,在设计之初应针对具体雷达的特性,把握选型、布置、电磁兼容性问题,使舰载雷达在装舰后能够发挥最大的作战能力,将电磁兼容性危害降低到最低点,并可通过有效的管理措施加以可靠控制。该文以某外贸型护卫舰设计过程中与国外大型雷达设备厂商进行技术经验交流为契机,针对舰船总体设计工作中雷达上舰的电磁兼容性设计特别针对船体桅杆等遮蔽物对雷达的遮挡问题进行了分析研究,并与外国厂商分析方法进行了对比学习,对今后舰船电磁兼容总体设计具有借鉴意义。

[关键词] 舰船总体设计;舰载雷达;电磁兼容

[中图分类号] U665.2 [文献标志码] A [文章编号] 1001-9855(2018)05-0144-06

## On Electromagnetic Compatibility of Shipborne Radar

CHEN Chen ZHAO Qi-min LI Guang-suo

(Marine Design &amp; Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** At the beginning of the design, the ship electromagnetic compatibility (EMC) designer should guarantee the selection, arrangement and EMC according to the specific characteristics of the radar, in order to maximize the operational capability of the shipborne radar and to minimize the EMC hazard. The reliable control can be achieved by the effective management. Communication of the technical experience is performed with a foreign radar equipment manufacturer during the design of a foreign trade frigate. It analyzes and studies the EMC design of the shipborne radar during the ship overall design, especially for the shielding of the radar against the shelter, such as the ship mast, and also compares with the analysis method of the foreign manufacturer. It can provide reference for the overall design of the ship EMC in the future.

**Keywords:** ship overall design; shipborne radar; electromagnetic compatibility

## 引言

舰载雷达作为当代舰船的主要探测装备,堪称舰船的“眼睛”,其首屈一指的军事地位和作用毋庸置疑。自从1939年第一部实用舰载雷达装载于美国海军纽约号战舰以来,雷达的巨大作战能力已

经得到了公认。雷达是通过目标发射电磁波并接收回波,获得目标至雷达的距离、径向速度、方位、仰角等目标信息。若舰船上的雷达配置合理、使用得当,可以满足本舰正常作战使用;但如果配置不合理、使用不当,则可能带来灭顶之灾。1982年英阿马岛战争,“谢菲尔德”号驱逐舰因雷达暂时

收稿日期:2018-07-16;修回日期:2018-09-18

作者简介:陈晨(1988-),男,硕士,助理工程师。研究方向:舰船装备设计。

赵齐民(1981-),男,本科,高级工程师。研究方向:舰船装备设计。

李光所(1979-),男,硕士,研究员。研究方向:舰船装备设计。



关闭,而被阿根廷“超级军旗”战机所携带的飞鱼导弹击沉<sup>[1]</sup>。1976年,美国航空母舰“福莱斯特”号因舰载雷达扫描波束照射到舰载机下方悬挂的一枚火箭弹而引发连环爆炸,舰上134人丧生,毁坏飞机27架。这些惨痛的历史教训告诉我们,雷达在提高舰船作战能力的同时,也蕴藏着巨大的危险。因此,不论出于对雷达的探测性能抑或舰上安全性的考量,对于雷达上舰的电磁兼容性进行研究与论证已势在必行。

## 1 国内外研究情况

国外对于干扰问题的研究历史比较早。1887年,德国的柏林电气协会就成立了“全部干扰问题委员会”。1934年6月,在巴黎成立了国际无线电干扰特别委员会。1944年,德国电气工程师协会首先制定了“VDE-0878”,成为世界上第一个电磁兼容性规范。20世纪80年代以来,随着计算机技术和高精度测量仪器的出现,国外在电磁兼容标准规范、分析预测、设计、测量及管理等方面都得到了高度的发展,形成一套完整的体系。<sup>[2]</sup>

我国的电磁兼容研究起步较晚,自20世纪80年代初,才开始组织电磁兼容标准及规范的研究;1983年,我国才发布了第1个电磁兼容国家标准GB/T3907-1983《工业无线电干扰基本测量方法》;20世纪90年代以后,随着中国经济技术和对外贸易的发展,电磁兼容开始逐步受到重视,一批电磁兼容检测中心和专门的电磁兼容性研究室才纷纷建立起来。

目前,国内在很多电磁兼容仿真测试技术上都取得了突破性进展,如雷达天线间电磁干扰问题、特殊位置电磁危害等通用化的问题都有针对性的预先估计方法和对应解决方案,而船体桅杆遮蔽物的结构形式和相对雷达的位置,因每型船的船体结构均不完全一致,很难形成体系化的解决方案,无法对总体设计进行技术支持,与国外大型雷达设备厂商存在一定差距。<sup>[3]</sup>

## 2 雷达上舰的电磁兼容性问题

舰载雷达的总体电磁兼容性分析研究一直是项重要工作,难度也较大,主要包括电磁干扰和电磁遮蔽两方面的问题。电磁干扰包括各雷达间的兼容性、与其他用频设备的兼容性,电磁辐射危害等,电磁遮蔽则主要包括船体桅杆等遮蔽物对雷达的遮挡影响。

对于此类问题,国内一般利用HFSS, FEKO, CST, ShipEDF等商用成熟仿真软件进行仿真,特别对于尺寸远大于相应雷达波波长的电大尺寸目标的电磁兼容性问题,相关科研院所均进行很多有益尝试,进行了算法的优化<sup>[4-5]</sup>。

### 2.1 电磁干扰问题

雷达间、雷达与其他系统的兼容性问题是由于设备间频率接近或成倍数,形成同频干扰或谐波干扰,影响设备的正常功能使用,一般可通过软件仿真分析计算。对于可能发生干扰的设备,通过滤波、匿影等电磁兼容管控手段进行干扰控制,降低电磁干扰影响;电磁辐射危害则指电磁辐射潜在的能对人员产生有害生物效应,或在燃油中引起火花,或能对武器或电引爆装置产生有害影响的危害。我国在电磁辐射危害的防护标准、措施上已有研究,并形成了相应的规范准则,现主要是利用电磁仿真软件对其天线辐射近场的功率密度进行计算,结合人员活动区域、燃油加注口、武器装置安装位置、直升机起降平台等重要场所进行辐射危害分析,提出电磁防护措施。<sup>[6]</sup>

### 2.2 电磁遮蔽问题

从电磁兼容角度来说,搜索雷达、跟踪雷达、通信天线等用频设备均希望周围视界中没有任何遮挡物,而实际舰船设计过程中不可能如此理想。例如,搜索雷达一般置于船体桅杆上,视界遮挡越小则性能越好。但是,一方面雷达本身较重,同时考虑到上建设备防雷击要求及其他重要设备的视界要求,搜索雷达在设计中不可避免地会被

部分船体顶桅遮挡。电磁遮蔽就是由于船体顶桅对雷达产生一定的遮蔽效应, 导致雷达在被遮蔽区域雷达威力及分辨力降低、虚警率升高。现今国内常规分析方法仅对雷达方向图相对变化量进行特征分析, 未对由此产生的性能指标绝对变化量深入研究。

### 3 遮蔽物对雷达的影响分析

由于船体顶桅对电磁波的介电常数、磁导率等电磁特性与空气介质有很大不同, 因此电磁波在从空气进入到顶桅介质后会产生反射、绕射和“折射”效应, 导致部分电磁波向外偏折一定角度发射, 在外场方向图上表现为集聚性能变差、增益降低, 旁瓣升高, 在性能上则表现为雷达威力及分辨力降低、虚警概率升高, 会对雷达整体性能产生很大的

影响; 当顶桅与雷达面距离接近到一定程度, 顶桅又会对雷达面的面电流分布产生一定的影响, 从某种程度上也会影响方向图的合成。

#### 3.1 遮挡物材质对雷达产生的影响

船体顶桅的材质普遍为金属或玻璃钢, 仅从电磁特性参数而言, 电磁波衰减等性能玻璃钢介质要好于金属介质, 但是电磁遮蔽问题涉及复杂的问题, 不能单从特性参数进行判断。

在电磁仿真环境下, 建立玻璃钢介质和金属介质顶桅模型, 对不同频率的雷达天线进行测试, 下图是针对某一频率下的仿真结果。图1是金属顶桅在不同角度遮蔽下, 雷达的方位面归一化方向图; 图2是玻璃钢顶桅在不同角度遮蔽下, 雷达的方位面归一化方向图。

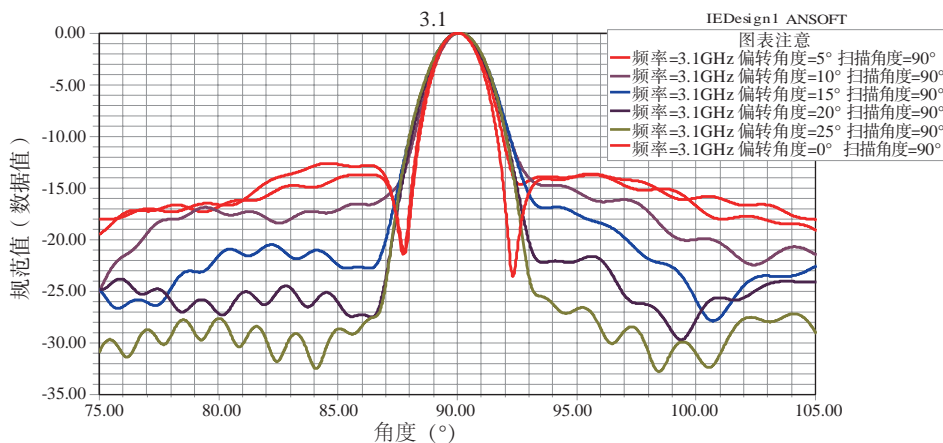
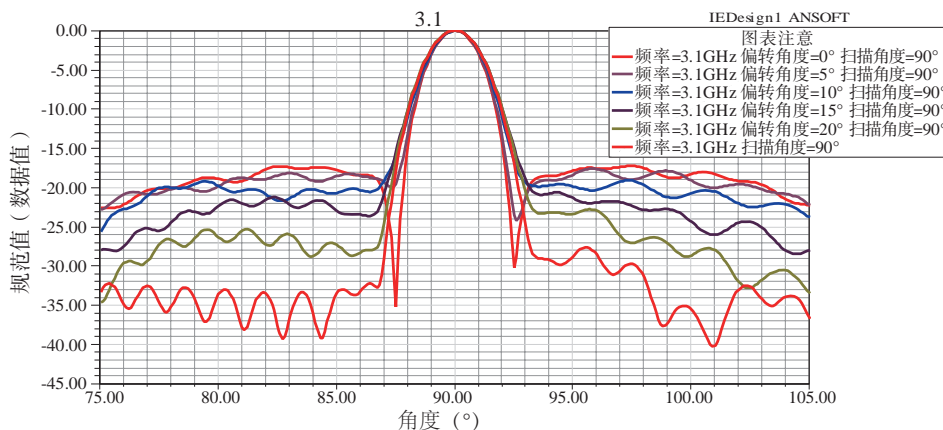


图2 玻璃钢顶桅遮蔽时的方位面辐射方向图

图3是遮蔽物处于雷达正后方时两种材质顶桅遮蔽对雷达增益的影响；表1是两种材质顶桅不同

方位遮蔽时副瓣增益变化，经过分析可以得到如下结果。

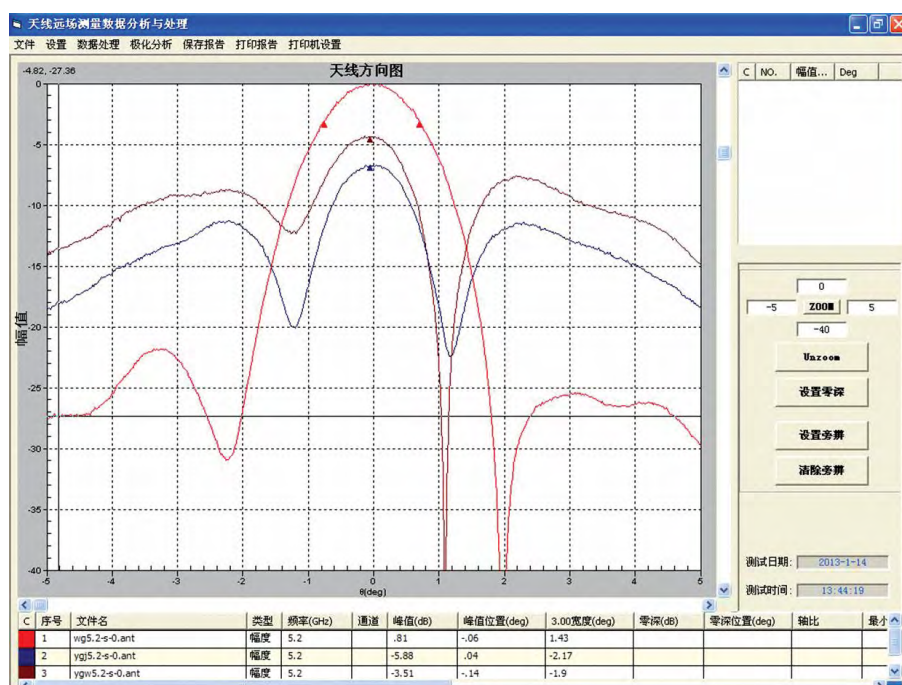


图3 0°位置下，两种材质遮蔽增益影响

表1 两种材质顶桅不同方位遮蔽时副瓣增益变化

介质	0°	5°	10°	15°	20°	25°	无遮挡
金属	-15.967 6	-16.224 6	-18.486 7	-22.094 4	-25.496 0	-30.876 9	-39.324 9
玻璃钢	-14.433 2	-15.672 9	-16.784 7	-18.771 2	-23.003 5	-30.033 4	-39.264 1

这些图表表示了0°位置条件下，玻璃钢顶桅与金属顶桅的遮蔽性能。可以看到：金属顶桅处于0°时，副瓣抬高23.4 dB、增益下降6 dB，影响较大，所处角度大于15°以后，其电性能影响较小；玻璃钢顶桅在扫描到0°时，副瓣抬高24.8 dB，增益下降4 dB，影响较大，所处角度大于15°以后，其电性能影响较小。

经过我们对于不同频率下的雷达天线的分析总结，得到了初步结论，在所有条件下，玻璃钢顶桅在对雷达增益影响均要远小于金属顶桅，但是对雷达副瓣抬高情况，玻璃钢顶桅并不一定好于金属顶桅，在某些条件下反而不如后者，这在我们的设计中是需要进行权衡的。

### 3.2 遮蔽物构形对雷达的影响

为研究舰船顶桅对天线的影响，本文尝试了如图4几种不同形状的顶桅，并将其对雷达天线性能的影响进行仿真分析。

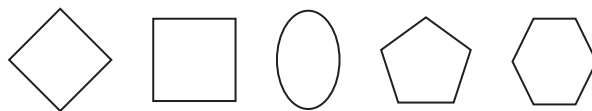


图4 几种不同形状的顶桅

根据相应构形的天线模型，对不同频率的雷达天线进行电磁仿真，可以得出不同频率下不同顶桅构形对雷达的遮蔽影响，如下页表2、表3所示是 $f=2.95\text{ GHz}$ 及 $f=4.725\text{ GHz}$ 中心频率下的性能指标。



表2  $f=2.95\text{ GHz}$ 中心频率下的性能指标

顶桅构形	增益 差值/dB	半功率 波束宽度/ (°)	副瓣电平/ dB	收发双向 电平/dB
无顶桅遮挡	0	2.073 6	-37.011 6	-74.023 2
圆柱形顶桅	-3.847 1	1.377 5	-18.314 2	-36.628 4
四棱柱顶桅	-4.064 6	1.190 1	-8.045 7	-16.091 4
正方形顶桅	-2.795 1	1.468 2	-21.067 5	-42.135 0
椭圆形顶桅	-1.567 9	1.698 2	-25.210 9	-50.421 8
五边形顶桅	-2.422 7	1.348 0	-17.105 8	-34.211 6
六棱柱顶桅	-1.437 4	1.649 5	-20.383 2	-40.766 4

表3  $f=4.725\text{ GHz}$ 中心频率下的性能指标

顶桅构形	增益 差值/dB	半功率 波束宽度/ (°)	副瓣电平/ dB	收发双向 电平/dB
无顶桅顶桅	0	1.973 4	-36.036 6	-72.073 2
圆柱形顶桅	-1.792 4	1.631 2	-20.703 3	-41.406 6
四棱柱顶桅	-0.697 1	1.488 2	-14.066 9	-28.133 8
正方形顶桅	-0.805 1	1.708 5	-21.797 5	-43.595 0
椭圆形顶桅	-0.215 9	1.764 2	-26.884 6	-53.769 2
五边形顶桅	-1.125 2	1.699 4	-21.616 4	-43.232 8
六棱柱顶桅	-2.918 4	1.393 6	-12.056 3	-24.112 6

由表2、表3结果可以看出,对于不同频率的雷达天线,椭圆形和六棱柱的顶桅构形对雷达的增益影响较小,椭圆形顶桅构形对雷达副瓣的影响最小。

## 4 国外对天线遮挡问题的处理

从国外雷达公司针对相关问题的论证报告来看,他们对雷达电磁兼容性问题的处理方法主要分为三部分:雷达电磁兼容性问题的理论分析、雷

达方向图仿真、雷达实际性能评估及处理方案,从理论分析到上舰后实际问题性能评估,逐层递进、论证严密,对于国内雷达相关问题的分析论证具有借鉴意义。

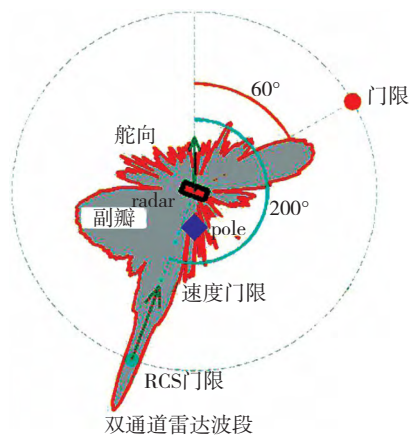
### 4.1 理论分析

根据桅杆遮挡形式,柱形桅杆位于舰首的后方,此雷达在工作时,方位面要求 $360^\circ$ 机械扫描。当雷达扫描到柱形桅杆附近时,由于电磁波遇到桅杆时会产生反射、绕射,故桅杆的影响不可忽略,并且通常会随着主波束与桅杆夹角的减小而影响愈发严重,其结果主要表现为雷达天线的辐射方向图畸变,增益明显下降,副瓣电平明显抬高等。增益的大小将直接决定雷达的探测能力(即探测距离);副瓣电平决定着雷达的灵敏度,过高的副瓣电平值将有可能导致错误报警,误导指挥人员下达错误的命令,从而造成不必要的损失。

### 4.2 雷达方向图仿真

国外雷达公司所采用的分析方法为射线跟踪法(Ray Tracing Toll, RTT)。射线跟踪法是在几何光学理论、几何绕射理论和一致绕射理论基础上发展起来的,其优点在于运算速度较快,缺点在于此类方法要求预先引入假设的射线,形成一部分人为误差。

如图5所示是船体桅杆偏离雷达正后方 $20^\circ$ 处遮挡时的方向图,与无桅杆遮挡的雷达方向图对比,可以将桅杆对雷达的影响进行量化分析。

图5 桅杆偏离雷达正后方 $20^\circ$ 时的方向图

### 4.3 雷达实际性能评估及处理方案

#### 4.3.1 对雷达探测威力的影响及处理方案

根据雷达方向图对比可以测得,当雷达正对桅杆时,天线增益下降大约 6 dB,其探测距离则减少了 30%。增益下降可以通过增加桅杆和雷达天线的间距,以及减小桅杆的尺寸来改善。

#### 4.3.2 对雷达虚警的影响及处理方案

根据雷达原理可知,收发辐射方向图由发射和接收的方向图叠加而成。也就是说,如果发射方向图的副瓣为 -20 dB,接收方向图的副瓣也为 -20 dB 的话,则收发辐射方向图的副瓣为 -40 dB。

考虑到主波束方向能够探测到的最小目标的雷达散射截面为  $0.1 \text{ m}^2$ ,也就是  $-10 \text{ dB m}^2$ 。如图 6 给出了雷达偏离桅杆不同角度时虚警目标的雷达散射截面:当桅杆正对天线时,天线收发方向图的副瓣高达 34 dB,此时会对雷达散射截面为  $24 \text{ dB m}^2$  的物体发生虚警,如民航客机等。当主方向偏离桅杆  $10^\circ$  时,其收发方向图副瓣达到 40 dB,此时会对雷达散射截面为  $30 \text{ dB m}^2$  的物体发生虚警,如小型护卫舰。当主方向偏离桅杆  $20^\circ$  时,会对护卫舰产生虚警,而偏离  $30^\circ$  时,此时只会对大型起重货船、重型油轮及转井平台产生虚警。

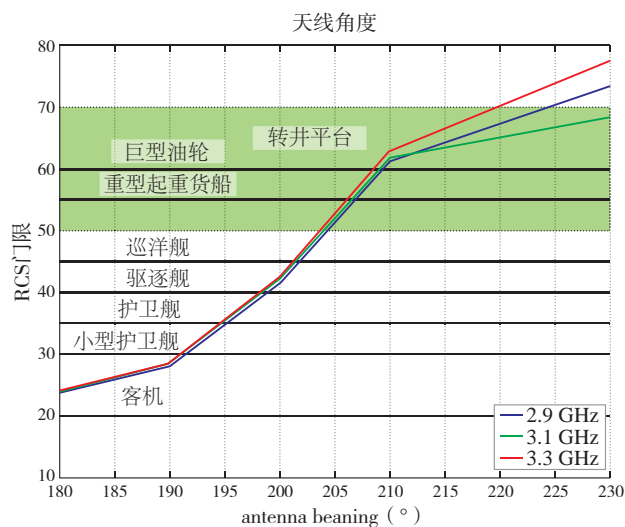


图6 各种虚警目标RCS

桅杆的遮挡总会对雷达天线的扫描范围产生影响。理论分析可知,把桅杆的尖角对准雷达,则会减小  $\pm 90^\circ$  方向的散射,从而降低天线的副瓣;而对于遮挡严重的区域,需要设置“不发射区”进行扫描范围的控制,以免产生雷达虚警,引起误判。

## 5 结 语

本文针对舰载雷达上舰的几个电磁兼容性问题进行了讨论。首先,以玻璃钢、金属两种顶桅和圆柱形、四棱柱形等六种形状顶桅为例,定量讨论了船体结构对雷达的遮蔽影响,可以看到,对于可能对雷达产生遮蔽的船体,材质的选择、形状的确定会对雷达性能产生很大影响,作为设计人员,需要针对设计重点进行综合考虑,优化舰载雷达的电磁遮蔽情况。其次,随着国际上商用软件的成熟,在电磁兼容处理手段上我国与世界先进雷达设备厂商基本处于同类水平,特别在电磁仿真优化方法的研究上更是处于先进水平,但是对仿真结果工程化,应用于雷达上舰后应用性能指标的量化评估,是我国应当向国外先进雷达设备厂商借鉴学习的。

### 【参考文献】

- [1] 毕季明,黄小华.海军舰船电磁兼容控制技术与措施[J].舰船电子工程,2007(2):201-203.
- [2] 杨显斌.一种舰载电子设备的电磁兼容性研究与设计[D].电子科技大学硕士论文,2010.
- [3] 王晖,覃宇建,刘培国.舰船电磁兼容仿真研究现状和发展趋势[C]//全国微波毫米波会议论文集(下册),2009:1498-1500.
- [4] 胡方靖.电大尺寸复杂隐身目标的精确建模和快速算法研究[D].电子科技大学硕士论文,2010.
- [5] 许晓曦.图形电磁学中的若干关键算法研究[D].南京理工大学硕士论文,2007.
- [6] 孙光胜.舰船电磁兼容技术发展综述[C]//电子技术2006年学术年会论文集,2006:66-68.