

引用格式: 历园园, 翟助群, 李思, 等. 基于高频算法的舰船电磁环境研究[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(2): 15-21, 34.
LI Yuanyuan, ZHAI Zhuqun, LI Si, et al. Research on the electromagnetic environment of ships based on the high frequency algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(2): 15-21, 34.

基于高频算法的舰船电磁环境研究

历园园¹, 翟助群², 李思¹, 李宇佳¹, 李文兴¹

1 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

2 海军装备研究院, 北京 100073

摘要: 现代化舰船上装备有大量的电子系统和设备, 研究舰船电磁环境对舰船电磁兼容性及其防御力的提高具有重要意义。首先用简单模型验证物理绕射理论(PTD)在计算目标的散射场时能够计算目标阴影区及边缘绕射场。进而采用物理光学法(PO)与PTD相结合的方法计算舰船周围电场强度, 并结合美军标MIL-STD-461C, 针对电磁辐射对舰船的危害进行初步预估, 得出电磁辐射对舰船的危害区域以及对人员的危害区域, 且舰船上层建筑所受电磁辐射危害较大。结合几何绕射理论(GTD), 计算出从源点到达桅杆处观察点的射线路径, 得到引起舰船上层建筑电磁辐射危害较大的原因是电磁波从源点辐射到舰船结构时, 在舰船表面发生了多次反射及绕射。结合3种算法研究舰船电磁环境, 对于研究舰船电磁兼容具有重要的参考价值。

关键词: 物理光学法; 物理绕射理论; 几何绕射理论; 电磁辐射危害; 电磁环境

中图分类号: U665.26; O441.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.02.004

Research on the electromagnetic environment of ships based on the high frequency algorithm

LI Yuanyuan¹, ZHAI Zhuqun², LI Si¹, LI Yujia¹, LI Wenxing¹

1 College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2 Naval Academy of Armament, Beijing 100073, China

Abstract: Research on the electromagnetic environment on ships that are mounted with many electric systems and equipment are of vital importance on improving the electromagnetic compatibility and protection capability. First, the physical theory of diffraction(PTD) algorithm is verified with simplified models, which can be used to calculate the target shaded area and edge diffraction field when calculating the scattered field. Then, the physical optics(PO) and PTD are combined to calculate the field around the ship illuminated by electromagnetic waves. Next, the results are compared to the MIL-STD-461C standard, and the hazard areas of the ship are estimated, revealing that the superstructure is the major hazard area. Finally, the ray tracing from the source to the view point beside the mast is obtained with the method of geometrical theory of diffraction(GTD), which successfully explains the potential threat of superstructures: the electromagnetic wave that impinges on the structure of the ship will be repeatedly reflected. In brief, the combination of a variety of algorithms for the studying of the ship electromagnetic compatibility has a great significance.

Key words: physical optics(PO); physical theory of diffraction(PTD); geometrical theory of diffraction(GTD); hazards of electromagnetic radiation; electromagnetic environment

0 引言

现代舰船都装备有大量的天线和电子设备,

电磁环境十分复杂。要提高舰船的适用性和战斗力, 就必须解决舰船的电磁兼容性问题。预测仿真真是开展舰船电磁兼容性研究的重要手段和方

收稿日期: 2014-10-20

网络出版时间: 2015-3-30 15:15:39

基金项目: 国家级重大基础研究项目

作者简介: 历园园, 女, 1985年生, 硕士生。研究方向: 电磁兼容性技术。E-mail: liyuanyuan008@hrbeu.edu.cn

李文兴(通信作者), 男, 1960年生, 硕士, 教授。研究方向: 电磁兼容性技术, 现代天线技术。

E-mail: liwenxing@hrbeu.edu.cn

法,即利用软件计算舰船设备与系统所处的电磁环境,并进行分析和评估^[1]。

舰船大量的电子设备在工作状态所产生的电磁辐射相互干扰,同时舰船结构又较为复杂。电磁波辐射到舰船结构后,特别是一些典型的结构,例如,桅杆、烟囱等,还会引起电磁波的多次反射、绕射等散射,这些散射场使舰船的电磁环境变得更加复杂。舰船周围总场强由入射场和散射场的叠加组成,因此,准确计算散射场对研究舰船电磁环境意义重大。Ship EDF^[2]软件在辐射/散射场的计算方面拥有先进的技术,由于各种电子设备在现代海军装备中的应用越来越广泛,该软件在此领域的分析研究中将会发挥巨大作用。因此,本文将利用 Ship EDF 软件对舰船电磁环境进行仿真研究,采用物理光学法(PO)与物理绕射理论(PTD)相结合的方法,计算舰船的电场分布,并利用几何绕射理论(GTD)计算研究舰船典型结构处的射线追踪。射线追踪对于舰船电磁环境的研究具有指引性的意义。首先,将对 PO+PTD 算法进行仿真验证,然后选取该算法研究舰船电磁环境以及电磁辐射对舰船上人员及设备的危害。

1 算法原理及算例分析

1.1 PO+PTD 方法原理及算例

PO^[3]是一种用于计算电大物体散射场的高频近似方法,其原理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求得散射场。当计算的散射体为电大尺寸时,PO用切向平面近似来表示积分中的总场。具体方法是:若物体的积分面元为理想的光滑平面,就可以用该平面的电流值来等效表面电流值。这一假设对任何形状的物体和材料都成立。当假定物体为理想导体时,则用 PO 计算的表面电流密度 \mathbf{J}_s 为:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_s &= 2(\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^i); \mathbf{M}_s = 0 && \text{照射面} \\ \mathbf{J}_s &= 0 && \text{阴影面} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{n}}$ 为表面的外法线单位矢量; \mathbf{H}^i 为磁场向量; \mathbf{M}_s 为磁流密度。根据 Stratton-Chu 积分方程,可知电场和磁场分别为:

$$\mathbf{E}^s = j \frac{\exp(-jk_0 r)}{r} \int_S \hat{\mathbf{s}} \times (\mathbf{M} + \eta_0 \hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{J}_s) \exp(jk_0 \mathbf{r}' \cdot (\hat{\mathbf{i}} - \hat{\mathbf{s}})) dS' \quad (2)$$

$$\mathbf{H}^s = -j \frac{\exp(-jk_0 r)}{r} \int_S \hat{\mathbf{s}} \times (\mathbf{J}_s - \frac{1}{\eta_0} \hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{M}) \exp(-jk_0 \mathbf{r}' \cdot (\hat{\mathbf{i}} - \hat{\mathbf{s}})) dS' \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{i}}$ 和 $\hat{\mathbf{s}}$ 为原点和场点方向单位向量; S 为被照射目标面。

由于物理光学法认为散射体阴影区的感应电流为 0,因此,表面电流只在散射体被源直接照射的区域才是准确的;而在阴影区,被遮挡的部分表面电流等于零是完全不正确的,在照明区和阴影区边界两侧的过渡区中,表面电流近似也是不准确的。PTD^[4]是对物理光学的引申和修正,它在几何光学阴影边界和射线焦散区都有效,不存在阴影边界和反射边界的奇点,PTD可以计算有边缘物体的边缘绕射场,且便于和 PO 结合^[5]应用,以计算复杂目标的散射场。用 PTD 方法计算时的感应电流为

$$\mathbf{J}_s^t = \mathbf{J}_s^{\text{PO}} + \mathbf{J}_s^{\text{ES}} \quad (4)$$

式中: \mathbf{J}_s^{PO} 为物理光学电流; \mathbf{J}_s^{ES} 为等效的边缘或不连续处电流。

因此,散射体表面电流由 2 部分组成,分别为原来的 PO 电流和边缘电流。

一正方形边长 20 m,如图 1 所示,电磁波从水平方向向正方形辐射电磁波。在辐射源的照射下,正方体的电场分布如图 2 所示。

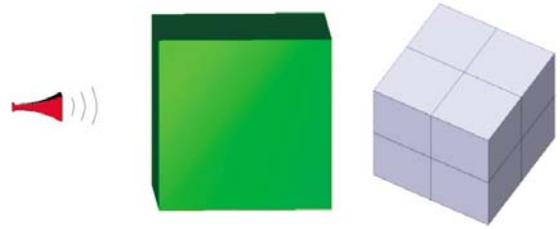
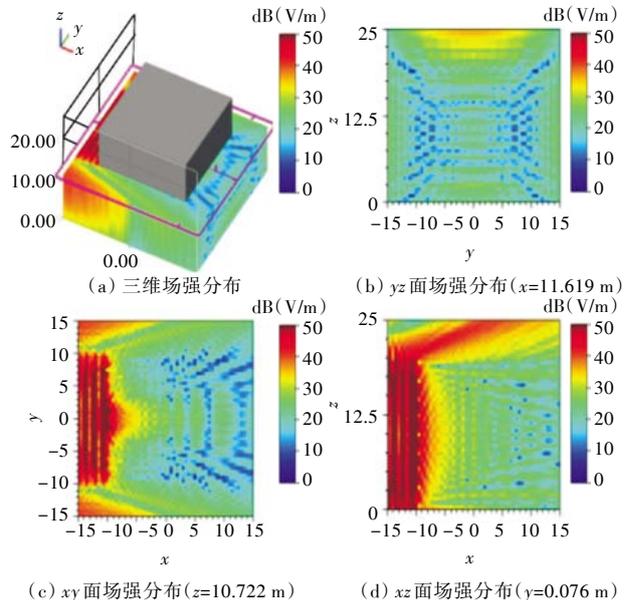
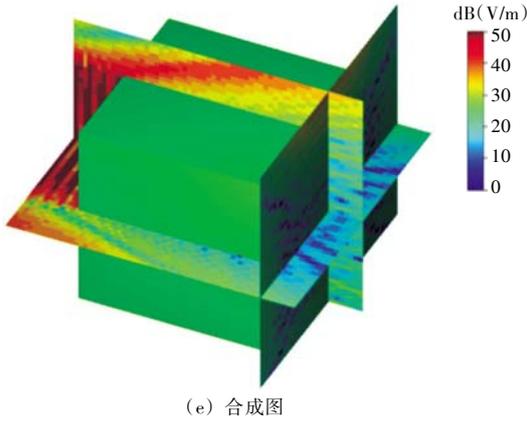


图1 正方形及其网格剖分图

Fig.1 Square and its PO mesh

图 2 为用 PO 与 PTD 结合计算得到的电场分布图。正方形背面有较弱的场强,但不为 0。





(e) 合成图

图2 正方体电场分布图

Fig.2 Field distribution of a square

一圆柱体半径 10 m,高 20 m,如图 3 所示。电磁波从水平方向向圆柱体辐射电磁波。在辐射源的照射下,圆柱体的电场分布如图 4 所示。

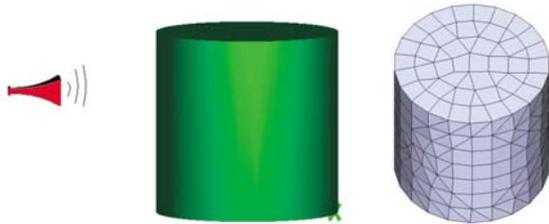
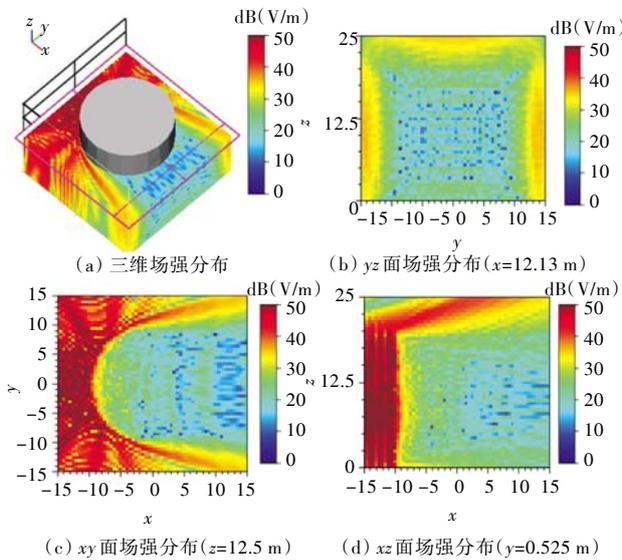


图3 圆柱体及其网格剖分图

Fig.3 Cylinder and its PO mesh

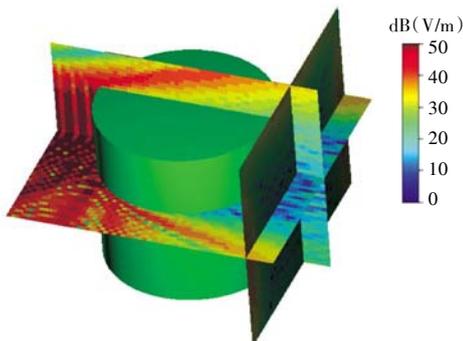


(a) 三维场强分布

(b) yz 面场强分布(x=12.13 m)

(c) xy 面场强分布(z=12.5 m)

(d) xz 面场强分布(y=0.525 m)



(e) 合成图

图4 圆柱体电场分布图

Fig.4 Field distribution of a cylinder

同正方体电场分布类似,图 3 和图 4 不仅给出了圆柱体背面较弱的电场,还可看出,电磁波是沿着圆柱体表面爬行的,在圆柱体表面形成了爬行波。

1.2 GTD 算法原理及算例

几何光学法(GO)是一种基于射线的方法,但只能处理直线、反射线和折射线,无法处理边缘绕射线,并且认为阴影区的场强为 0。而在实际计算中,总场不仅在几何光学的阴影区有大小不等的连续场存在,还包括由边缘引起的绕射场存在。GTD^[6]是对 GO 理论的修正与扩展。GTD 设想绕射场和几何光学场一样沿射线路径传播,当入射射线遇到任何一种不连续表面,如边缘、尖顶或曲面时,都将产生绕射场,绕射场离开绕射点后仍按几何光学射线传播,消除了几何光学射线阴影边界上场的非连续性。

几何光学场的基本公式为

$$E_2 = E_1 \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} e^{-jks} \quad (5)$$

式中: ρ_1 和 ρ_2 分别为两个波面的曲率半径; s 为两个波面之间的射线长度; E_1 为 $s=0$ 处的场强振幅; e^{-jks} 为空间相位的延迟因子。

设有一条边缘绕射线从源点 O 经过物体边缘上的绕射点 Q 而到达场点 P , Q 点的绕射过程可表示为

$$F^d(Q) = E^i(Q)D \quad (6)$$

式中: $E^i(Q)$ 为 Q 点入射场; D 为并失绕射系数; $F^d(Q)$ 为 Q 点的激励系数。绕射射线在离开绕射点后仍服从几何光学规律,因此,场点 P 的绕射场可以表示为

$$E^d(P) = F^d(Q)A_d(s^d)e^{-jks^d} = E^i(Q)D \sqrt{\frac{\rho_1^d \rho_2^d}{(\rho_1^d + s^d)(\rho_2^d + s^d)}} e^{-jks^d} \quad (7)$$

式中: $A_d(s^d)$ 为说明能量沿绕射线扩散的因子; e^{-jks^d} 为绕射场沿绕射线的相位变化的因子; s^d 为沿绕射线从 Q 点到 P 点的距离。则总场可以表示为几何光学场与绕射场的和。

用 GTD 可以计算从辐射源到目标观察点之间的射线路径。正方体边长为 20 m,圆柱体底面半径 10 m,高 20 m,电磁波从水平方向分别向正方体和圆柱体辐射电磁波,从辐射源到达观察点的射线数量及射线路径如图 5 所示。

图 5(a)给出了辐射源到正方体背面一观察点的射线轨迹。从图中可以看出,观察点的散射场主要是入射线到达正方体的边缘后绕射产生。

图5(b)给出了从辐射源到达圆柱体背面一观察点的射线轨迹。从图中可以看出,该点的散射场是由圆柱体表面的爬行波产生。这两个算例的射线追踪结果说明,GTD能够消除阴影区边界上场的不连续性。

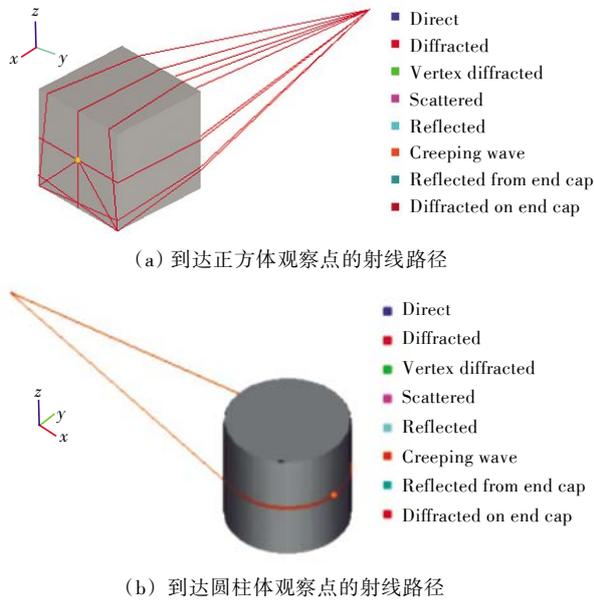


图5 到达观察点的射线路径

Fig.5 Ray tracing of an observation point

综上所述,在对目标进行电磁环境分析时,可以用PO与PTD相结合的算法计算目标周围电场的强度,以提高电场强度计算时的准确度。同时,对于任一观察点,可以用GTD算法计算从辐射源到达该观察点的射线追踪路径,从而得出该点散射场的构成,并在此基础上对舰船结构以及天线布局做出改进。

2 舰船电磁环境分析

本文采用的是由意大利IDS公司研制开发的用于分析船体电磁分布的Ship EDF软件,它能结合天线和船体进行电磁兼容和干扰分析。该软件几乎涵盖了舰船电磁设计和维护的所有工具,可以对舰船的电磁参数和数据进行总体控制,这样就可以对每个电磁性能进行综合认识和全局掌控,在一个统一的CAD环境下对舰船的几何结构和电磁特性进行研究与设计。Ship EDF在辐射/散射场的电磁计算方面拥有先进的技术,可以为大型舰船的电磁设计提供先进的模拟技术^[7]。

首先,设计一个角锥喇叭天线作为辐射源,用作辐射源向舰船辐射电磁波;其次,建立目标舰船模型;最后,采用前面总结的方法对舰船电磁环境进行计算分析,即用PO与PTD相结合的方法计算舰船的电场分布,并用GTD算法计算舰船

典型结构上某一观察点处的射线追踪。

2.1 辐射源

设计了一个角锥喇叭天线^[8]作为辐射源向舰船辐射电磁波,当选择频率为500 MHz,预期增益为20 dB时,天线的具体结构参数如表1所示。

表1 天线基本结构参数
Tab.1 Dimensions of the antenna

参数	数值
天线口径长度 A/m	2.7
天线口径宽度 B/m	2.08
天线长度 m	3.6
波导宽度 a/m	0.42
波导高度 b/m	0.3
波导长度 m	0.4
H面长度 R_H/m	3.6
E面长度 R_E/m	3.6

天线模型及其方向图分别如图6和图7所示。从图中可以看出,该天线具有高增益、方向性好的特点,符合研究需求。在之后的舰船电磁环境研究中,将使用该天线作为辐射源,向舰船辐射电磁波。

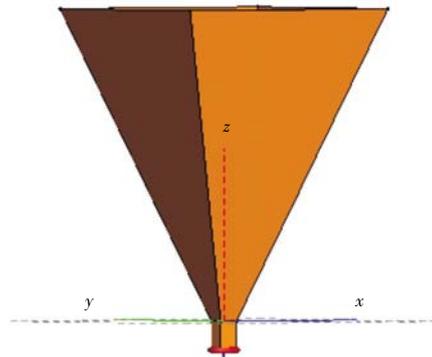
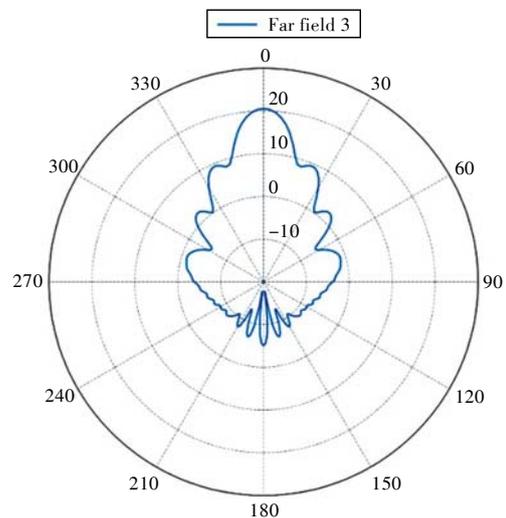
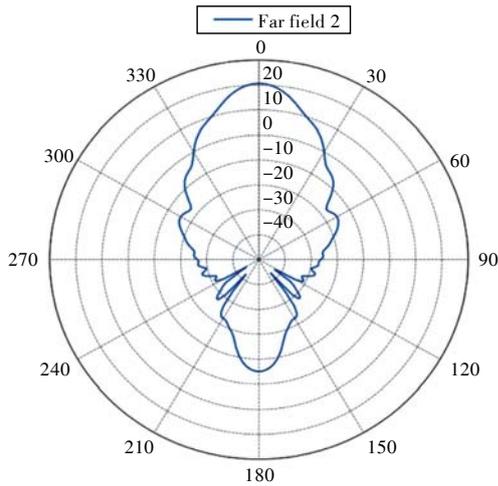


图6 天线模型

Fig.6 Model of antenna



(a) 90°远场方向图



(b) 0°远场方向图
图7 天线方向图
Fig.7 Pattern of the antenna

2.2 舰船电场计算

建立目标舰船模型,舰船模型长155 m,宽20 m,甲板高5.6 m,舰船表面为理想电导体材料。安装天线模型,令天线从距离舰船甲板中心100 m的方向向舰船辐射电磁波,频率为500 MHz,如图8所示。分别计算舰船在辐射源照射下的表面电流及舰船周围的电场强度,其中图9为舰船的表面电流分布,图10为天线向舰船辐射电磁波时xz切面的电场分布,图11为舰船桅杆附近电场分布切面图。

从图9的舰船表面电流分布情况可知,当图8中所示的天线向目标舰船辐射电磁波时,舰船表面电流在舰船上层建筑周围较大。从图10中可明

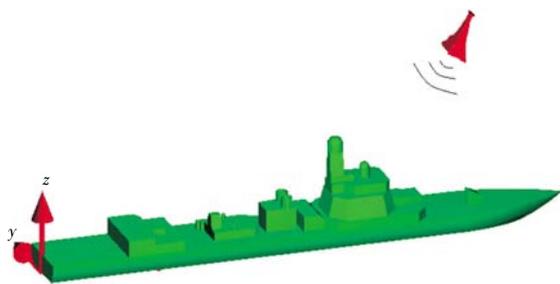


图8 舰船模型
Fig.8 Warship model



图9 舰船表面电流分布
Fig.9 Current distribution on the surface of the ship

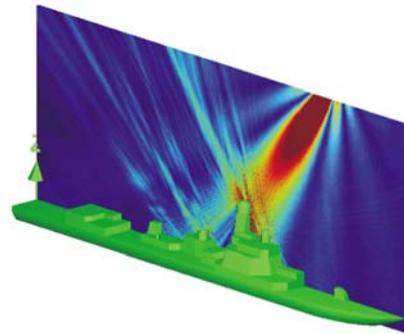


图10 xz平面电场分布
Fig.10 Field distribution of the xz plane

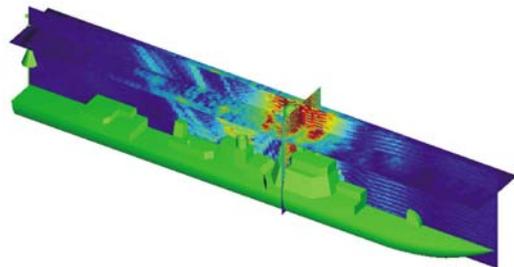


图11 舰船电场分布切面图
Fig.11 Field distribution on the selected plane of ship

显看出舰船结构引起的到达舰船的电磁波的反射,结构越复杂,电场分布越复杂,因为舰船周围总场为入射场与散射场的矢量叠加,且从图中可明显看出上层建筑对散射场的贡献。图11重点给出了上层建筑在3个平面的电场切面图,从图中可知上层建筑附近的电场分布^[9]。由舰船的电场分布可知,在天线的辐射下,舰船电场分布最复杂的区域是上层建筑,因此在舰船桅杆上选取一参考点,用GTD算法计算从辐射源到达舰船桅杆上一观察点的射线路径,通过对射线轨迹的追踪可以研究舰船典型结构对观察点处散射场的贡献。

图12(a)所示为从源点到观察点的直射,图12(b)为仅1阶绕射,图12(c)为仅2阶绕射,图12(d)为既有1阶绕射,又含有2阶绕射。射线颜色代表的是射线场强值。其中,绕射包含顶点绕射和平板绕射,即电磁波照射到舰船结构的顶点和平板后多次反射到观察点的射线,到达观察点的射线数量越多,说明舰船结构越复杂。观察点处的散射场即为到达观察点处的直射、反射及绕射场的矢量叠加。

结合GTD计算所得的结果,不仅可以为研究舰船典型结构电场分布提供依据,还进一步直观地验证了用高频算法可以更加准确地计算舰船电场强度,因为舰船结构引起的电磁波多次的反射及绕射对舰船周围的散射场贡献很大,而PTD能够计算舰船结构中边缘及阴影区产生的散射场。

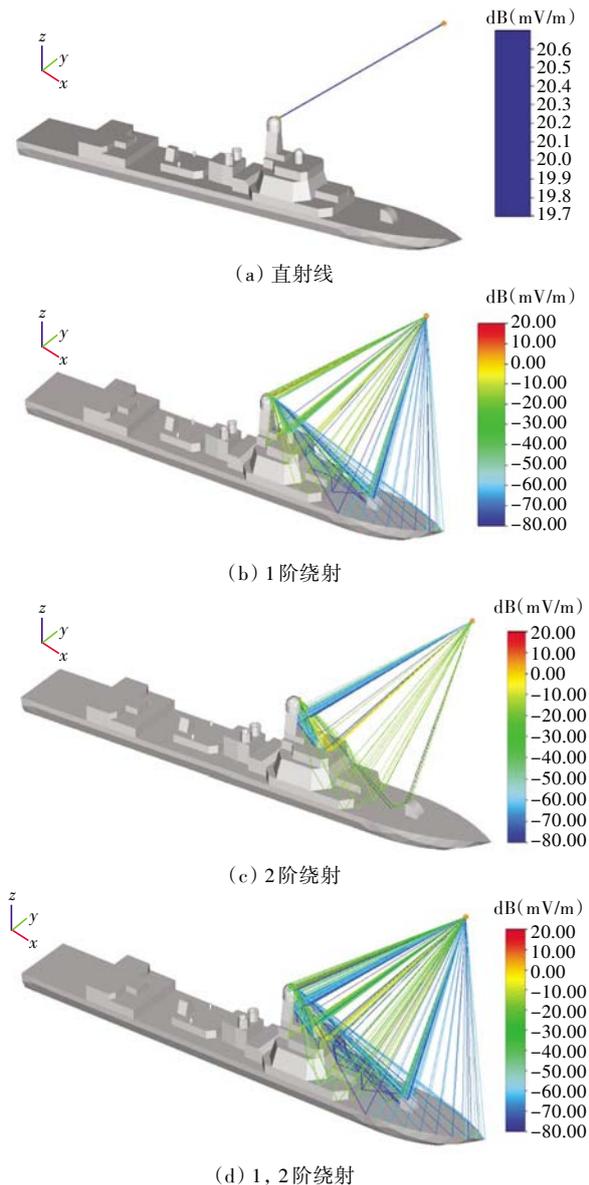


图12 从辐射源到达观察点的射线追踪

Fig.12 Ray tracing from the source to the view point

3 舰船危害区域分析

电磁辐射危害(简称EMRADHAZ)指人体、设备、军械或燃料暴露于危险的电磁辐射环境中时,由电磁能量密度导致的打火、挥发性易燃品的燃烧、有害的人体生物效应、电引爆装置的误触发、安全关键电路的故障或逐步降级等。根据图10和图11所示的舰船电场分布,可知上层建筑处电场环境复杂,电场强度较大,该部位通常是电子设备较集中的结构。随着现代高科技的迅速发展和广泛应用,各种高技术电子设备的核心都是一些制作非常精密、技术非常先进的电子计算机、半导体集成电路及弱电流控制软件系统。这些高技术的电子设备集成度越大,其电磁敏感度就越高,当其周围电磁场、电压、电流变化时,就越容易损坏,电磁辐射带来的危害将更加突出,会破坏舰船的

电磁兼容性,削弱舰船战斗力。因此,对舰船结构进行电磁辐射危害分析具有重要的意义。

2010年,美国军用标准MIL-STD-461C给出的电磁辐射对军械危害的外部电磁环境如表2所示。

表2 电磁辐射对军械危害的外部电磁环境

Tab.2 Maximum external EME levels for ordnance

频率/MHz	电场强度/(V·m ⁻¹)			
	不受限制电磁环境		受限制的电磁环境	
	峰值	平均值	峰值	平均值
0.01~2	200	200	80	80
2~30	200	200	100	100
30~150	200	200	80	80
150~225	200	200	70	70
225~400	200	200	100	100
400~700	2 200	410	450	100
700~790	700	410	270	270
790~1 000	2 600	490	1 400	270
1 000~2 000	6 100	600	2 500	160
2 000~2 700	6 000	500	490	160
2 700~3 600	27 460*	2 620*	2 500	220
3 600~4 000	8 600	280	1 900	200
4 000~5 400	9 200	660	650	200
5 400~5 900	9 200	660	6 200	240
5 900~6 000	9 200	270	550	240
6 000~7 900	4 100	400	4 100	240
7 900~8 000	550	400	550	200
8 000~8 400	7 500	400	1 100	200
8 400~8 500	7 500	400	1 100	200
8 500~11 000	7 500	910	2 000	300
11 000~14 000	7 500	680	3 500	220
14 000~18 000	8 700	680	8 700	250
18 000~50 000	2 900	580	2 800	200

*在2 700~3 600 GHz范围内舰船操作时的电磁环境电场,而对于其他的操作,不受限制的电磁环境电场为12 667 V/m,受限制的电磁环境为1 533 V/m。

表中,“受限制的电磁环境”表示人员与军械直接接触(组装/拆卸、装载/卸载)的环境,要防止人员暴露在危险的电磁能量电平中或接触电流;“不受限制的电磁环境”表示军械暴露于最严酷的环境中。电磁辐射同样对人体有危害,根据HJB34规定,金属体感应电压不得超过100 V,否则对人员具有危害性。

根据电磁辐射危害标准,对舰船电磁环境进行电磁辐射危害的估计可以为舰船天线布局、武器装备的安装提供参考,并根据辐射危害的估计对工作人员以及军械装置采取防护措施。

将MIL-STD-461C给出的电磁辐射对军械危害的外部电磁环境标准与Ship EDF软件结合,分析舰船受到的电磁辐射危害。具体方法是,将MIL-STD-461C给出的电磁辐射危害标准存入Ship EDF的危害标准数据库,并对舰船周围电场强度划分危害边界,当计算舰船电场时,将该标准

数据与计算得到的电场值扫描比对,从比对结果中提取危害极限,并在舰船的三维CAD图形中显示出来,从而可以直观显示舰船受到危害的区域。

设定天线的发射功率为 100 000 W,频率为 500 MHz时,根据表 2 的标准得出电磁辐射对舰船上层建筑的危害如图 13 所示,图 13(a)~图 13(d)分别为舰船上层建筑的三维结构图及 3 个平面的截面图。其中,红色代表危险,绿色及周围没有颜色的部位代表安全。

由图 13 的受害区域可以看出,舰船的上层建筑部分受到的电磁辐射危害较大。舰船上层建筑周围的电场强度超过了表 1 中的标准,呈现红色。

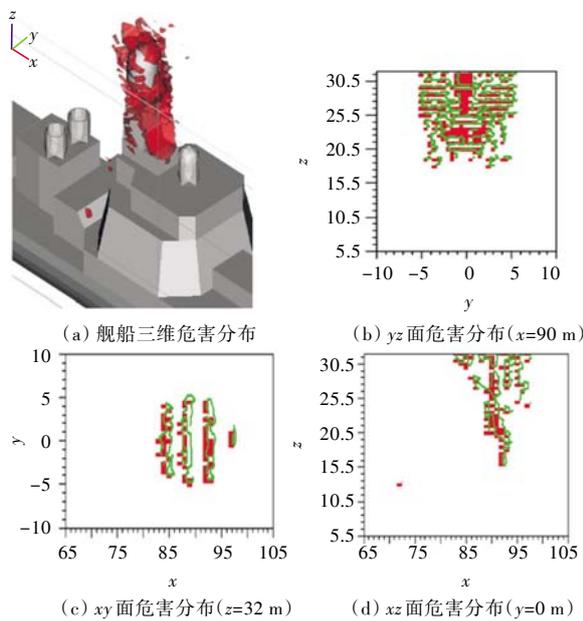


图 13 电磁辐射对舰船的危害分布图

Fig.13 Hazard distribution of ship radiated by electromagnetic wave(for ordnance)

根据 MIL-STD-461C 给出的电磁辐射标准,电磁辐射对人员能触及的金属体上的感应电压应小于 100 V。将危害边界电场设置为 100 V,并与电磁波照射舰船时计算得到的电场值进行扫描比对,得到电磁辐射对舰船上人员的危害的估计如图 14 所示。

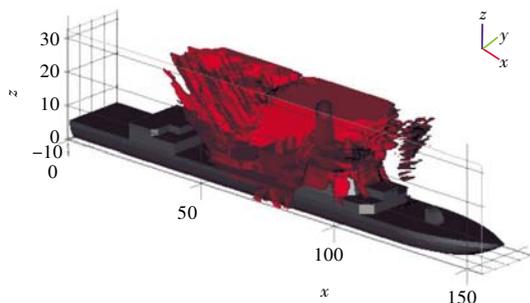


图 14 电磁辐射对人员的危害分布图

Fig.14 Hazard distribution of ship radiated by electromagnetic wave (for personnel)

红色区域代表舰船在辐射源的照射下,电场强度超过标准限值的区域。由图 14 可知,当设定的天线从距离舰船甲板中心 100 m 处向舰船辐射电磁波时,舰船上红色区域的电场强度超过了人员所能承受的 100 V/m,仅舰艏和舰艉所在区域对于人员是安全的区域。由此可知,复杂的电磁环境不仅威胁着舰船上的电子设备,更会对人员造成伤害。因此,研究电磁辐射对舰船电磁环境影响及电磁危害的防护方法意义重大。

4 结 语

本文首先介绍了高频近似算法 PO,PTD 和 GTD 的基本原理,并给出了简单的算例,说明采用高频近似算法能有效计算舰船电场分布,并给出源点到某一观察点的射线追踪轨迹。根据 GTD 算法射线追踪,可以得到任意原点到观察点的射线路径,这对于分析舰船电磁环境具有重要意义。通过计算得出,当天线从距离舰船甲板中心 100 m 处向舰船辐射电磁波时,舰船上层建筑受到的危害较大,该处电磁环境较复杂,其中由舰船结构引起的绕射场是散射场的重要组成部分。同时,根据美军标 MIL-STD-461C 中电磁辐射对军械危害的外部电磁环境标准,对舰船电磁辐射危害做出评估,得出电磁辐射对舰船上层建筑部分危害的区域以及舰船上的人员及军械设备易受到电磁辐射危害的区域。计算所得到的结果对于研究舰船电磁兼容性和防护以及为舰船提高战斗力具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 刘尚合,孙国志.复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. 武器装备指挥技术学院院报,2008,19(1): 1-5. LIU Shanghe, SUN Guozhi. Analysis of the concept and effects of complex electromagnetic environment [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(1): 1-5.
- [2] IDS Ingegneria Dei Sistemi SpA. Ship EDF [EB/OL]. [2014-5-25]. <http://www.t-solutionglobal.com/publish2/ProL.aspx? AID=8>.
- [3] 何国瑜,卢成才,洪家才.电磁散射的计算和测量[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006: 224-231.
- [4] UFIMTSEV P Y. Fundamentals of the physical theory of diffraction[M]. U.S.A: John Wiley & Sons, 2014.
- [5] DING W P. FEM/PO-PTD for evaluation of scattering by complex objects[C]//IEEE Antennas and Propaga-

(下转第 34 页)

- search (PIER), 2007, 75: 253-269.
- [3] XIONG R B, CHEN J J, HAN Y Y, et al. Transient resistance analysis of large grounding systems using the FDTD method [J]. Progress in Electromagnetics Research (PIER), 2012, 132: 159-175.
- [4] YANG M, CHEN Y. AutoMesh: an automatically adjustable, nonuniform, orthogonal FDTD mesh generator [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1999, 41(2): 13-19.
- [5] HILL J. Efficient implementation of mesh generation and FDTD simulation of electromagnetic fields [D]. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 1996.
- [6] ZHU H, GAO C, CHEN H L, et al. The research on FDTD mesh generation and visualization technology [C]//Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM). Beijing, 2012: 282-284.
- [7] YANG J, SU D L, ZHAO X Y. The study and realization of automatic mesh generation based on electromagnetic simulation of FDTD [C]//IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications 2009. Beijing, 2009: 1242-1245.
- [8] SHA W, WU X L, HUANG Z X, et al. A new conformal FDTD (2, 4) scheme for modeling three-dimensional curved perfectly conducting objects [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(3): 149, 151.
- [9] WANG J, YIN W Y. Development of a novel FDTD (2, 4)-compatible conformal scheme for electromagnetic computations of complex curved PEC objects [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(1): 299-309.
- [10] YUAN X, YIN W Y, WANG X H, et al. Optimized conformal FDTD (2, 4) method for calculating reflected and diffracted electromagnetic fields of perfectly conducting wedges [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(2): 466-474.
- [11] WALDSCHMIDT G, TAFLOVE A. Three-dimensional CAD-based mesh generator for the dey-mitra conformal FDTD algorithm [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(7): 1658-1664.
- [12] BENKLR S, CHAVANNES N, KUSTER N. Mastering conformal meshing for complex CAD-based C-FDTD simulations [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2008, 50(2): 45-57.
- [13] VACCARI A, CALA' LESINA A, CRISTOFORETTI L, et al. Parallel implementation of a 3D subgridding FDTD algorithm for large simulations [J]. Progress in Electromagnetics Research (PIER), 2011, 120: 263-292.

[责任编辑:喻 菁]



(上接第21页)

- tion Society International Symposium, 2004, 1: 363-366.
- [6] 汪茂光.几何绕射理论[M].西安:西安电子科技大学出版社,1994:159-167.
- [7] IDS Ingegneria Dei Sistemi SpA. Advanced approach to electromagnetic & signature design of modern naval platforms [EB/OL]. [2014-6-27].http://www.armed-forces-int.com/article/advanced-approach-electromagnetic-signature-design-modern-naval-platforms.html.
- [8] STUTZMAN W L, THIELE G A. 天线理论与设计 [M].朱守正,安同一,译.北京:人民邮电出版社, 2006:258-292.
- [9] 吴小川.复杂电磁环境下电磁场分布特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

[责任编辑:喻 菁]