战场复杂电磁环境的仿真与构建方法研究

丁潇，陈亚洲
（军械工程学院 静电与电磁防护研究所，石家庄 050003）

摘要：战场电磁环境对武器装备的安全性和作战效能的发挥具有重要影响，对信息化战争意义重大。为检验武器装备在复杂电磁环境下的生存能力，对复杂电磁环境进行仿真和构建具有重要意义。分析了复杂电磁环境对信息化战争的影响及其仿真构建方法，采用模拟仿真的方法，构建了一定条件下的电磁环境，并利用混响室进行了实验验证，结果表明复杂电磁环境仿真与构建具有效性和可行性，为进一步开展武器装备复杂电磁环境效应研究奠定了基础。

关键词：电磁环境；仿真；战场
中图分类号：TP391.9；O441　　**文献标识码：**A
文章编号：1672－9242(2011)01－0033－05

Research on Simulation and Construction Method of Complex Battlefield Electromagnetic Environment

DING Xiao，*CHEN Ya-zhou*
（Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection，Ordnance Engineering College，Shijiazhuang 050003，China）

Abstract：Battle field electromagnetic environment has important influence on security and fighting efficiency of weapon, and also has important meaning to information-based war. In order to examine the survival ability of weapon under complex electromagnetic environment, it is significant to carry on simulation and construction of complex electromagnetic environment. The influence of complex electromagnetic environment on information-based war and the method of simulation and construction were analyzed. Simulation method was applied to construct the electromagnetic environment under certain condition. Reverberation chamber experiment was used to verify to the simulation. The results showed that simulation and construction of the complex electromagnetic environment is valid and feasible. This research establishes a foundation for further studying the effect of complex electromagnetic environment on weapon.

Key words：electromagnetic environment；simulation；battlefield

随着世界新军事变革的发展，现代战争已逐渐演化为“陆、海、空、天、电磁”五维一体的联合作战。战场上，为了充分发挥武器装备的作战效能，掌握战争的有利态势，电磁领域的斗争成为了军事斗争的

收稿日期：2010-05-10
作者简介：丁潇(1986—)，男，河南信阳人，硕士研究生，主要从事电磁场仿真与效应评估技术研究。

焦点，所以取得制电磁权对获得战争主动权至关重要。随着干扰和抗干扰技术不断发展，战场电磁环境也随之复杂多变。在一定的作战时空内，战场复杂电磁环境主要指人为电磁发射和自然电磁现象的总和，主要包括：敌、我双方的电子对抗；各种武器装备所释放的高密度、高强度、多频谱的电磁波；民用电磁设备的辐射和自然界产生的电磁波等。在信息化战场上，由于现代军用雷达、通讯、导航等辐射体的辐射功率越来越大，频谱越来越宽，电磁辐射源的数量也成倍增加，电磁脉冲武器的出现以及静电危害源的普遍存在，都使现代战场的电磁环境日趋复杂[1]。复杂的电磁环境已经渗透于战场预警侦查、指挥控制、作战协同等各个方面，对作战判断决策的正确性、作战效能的发挥等都产生了十分广泛的影响，从而影响整个战争的态势及战斗进程。

1 复杂电磁环境的构建方法分析

为提高军队复杂电磁环境下的作战能力，构建和模拟复杂电磁环境的研究是一个热点。构建复杂电磁环境，就是要力求构建接近实战的战场电磁环境。近年来，国内外军事训练中复杂电磁环境的构建方法，除了利用真实的武器装备产生的电磁环境外，还有大量依靠各类信号模拟器、计算机模拟技术、分布交互仿真技术构建的电磁环境等[2]。

1.1 实物模拟构建法

实物模拟构建法是指依据所面临的电磁环境的构成要素，使用电磁辐射装备进行实物实地布设而形成复杂电磁环境的方法。该方法构建的关键是要准确把握敌、我和民用各方电磁辐射设备的种类和数量。这样构建出的实体电磁环境，可以使人员真实感受复杂电磁环境的影响，适用性强，效果可靠。

由于这种方法是采用真实的电子装备进行实物实地布设的，其电磁环境构建具有针对性且效果好。在具体构建时，可采用某些电子对抗装备，模拟出一定的电磁环境，用于作战训练和演练，提高复杂电磁环境下的作战和生存能力。由于电磁环境构成的复杂性，实物实地布设对电磁辐射源种类、数量需求大，对技术要求较高，实际操作难度比较大，经济投入也高。

1.2 模拟器仿真构建法

模拟器仿真构建法，主要是用信号辐射源模拟电磁信号，构建出复杂电磁环境。利用模拟器，产生有针对性的电磁环境，其模拟器费用低、效果好、使用简单，是世界发达国家军队普遍采用的方法。具体构建时，需要在一定的地域内，对该区域有影响的电磁态势进行分析，利用功能分析法或信号分析法，通过调整各信号辐射源发射电磁信号的频率、功率以及信号辐射方向等，灵活模拟电磁环境。此方法的关键在于研制信号辐射源，其一般由系统控制器、信号产生器、功率放大器和天线组成。信号辐射源既可通过现役装备改装得到，也可以研制生成。由于其为专属电磁信号辐射体，在造价较低的情况下，可以模拟战场上多种电磁信号，较为经济节约，模拟出的复杂电磁环境逼真程度较高[3]。

1.3 计算机模拟仿真技术构建法

为了使训练场更加接近战场环境条件，采用计算机模拟与仿真技术来模拟未来战争中武器装备系统的性能指标、作战效能、战场背景、战场环境、兵力部署以及模拟战斗态势和战斗过程，也是比较常见的一种环境构建方法。模拟过程中，计算机除了可以模拟武器装备的作战效能、战场环境，还可以在改变电磁环境参数的情况下，迅速模拟出新的战场态势。

在现代联合作战条件下，为了构建更大规模的联合作战环境，还可采用分布交互仿真技术，产生复杂战场电磁环境。分布交互仿真技术以计算机网络为基础，连接整个仿真系统，生成人工合成的多武器平台这样一种电子环境，从而形成一种虚拟的作战环境。目前，该技术还处于研究发展之中，在复杂电磁环境模拟与仿真中应用还有一定困难，仍有许多技术难题有待解决，另外还有成本问题等。

2 复杂电磁环境仿真与构建

通过对几种复杂电磁环境仿真构建方法的分析，根据现有实验条件，采用模拟仿真构建的方法来构建一定条件的复杂电磁环境。

实验方案：利用FEKO软件进行电磁环境的仿

真,分析辐射的电磁场;为产生空间均匀、各向同性、随机极化的电磁环境,根据仿真的结果,采用辐射天线,配合功率放大器,在混响室构建一定条件的电磁环境。用电磁场测试系统进行数据测量,分析所产生的电磁环境,与仿真结果进行数值比较,进而改进实验方案。

2.1　复杂电磁环境的仿真

利用仿真软件FEKO对混响室进行实体建模,仿真模型如图1所示。

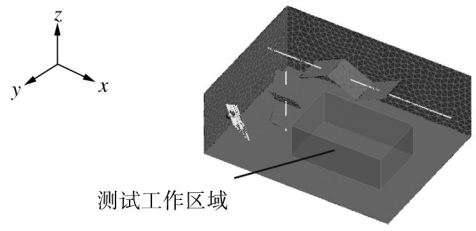


图1　混响室仿真模型

Fig. 1　Simulation of reverberation chamber

混响室建模时,屏蔽腔体尺寸为9.92 m × 7.44 m × 4.06 m,以腔体的一个角为坐标原点建立直角坐标系,腔体的长边沿x轴方向为9.92 m,宽边沿y轴方向为7.44 m,高沿z轴方向为4.06 m。搅拌器为2个,呈Z形,主搅拌器横向放置,副搅拌器竖向放置。发射天线为对数周期天线,频率为95.54~144.23 MHz,最短振子为1.04 m,最长振子为1.57 m,天线长为0.885 m,其材料均采用理想导体。根据谐振腔理论,该屏蔽腔体的谐振频率为:

$$f_{mnp} = \frac{c_0}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{H}\right)^2} \tag{1}$$

式中:c_0为光速;m,n和p为非负整数,且最多有1个为0,代表屏蔽腔内电磁场谐振波模形式;L,W,H分别为屏蔽腔体的长、宽、高[4−5]。

当m=1,n=1,p=0时,根据式(1),得该屏蔽腔体的最低谐振频率:

$$f_{110} = \frac{c_0}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{H}\right)^2} = 25.2\ \text{MHz}$$

根据IEC 61000−4−21,为满足混响室场均匀性要求,最低工作频率至少为最低谐振频率的3倍,即其工作频率应大于75.6 MHz。在此选用100 MHz作为工作频率,那么在评价工作区场均匀性所计算的标准偏差σ应低于IEC 61000−4−21要求的场均匀性限值4 dB。这个标准偏差是在搅拌器旋转1周的情况下,在矩形工作区域的8个顶点位置处对输入功率归一化的最大场强值的标准偏差[6]。由于工作区域距离混响室的墙壁、发射天线及搅拌器至少为1 m,在此选择矩形测试区域坐标区间$x\in(3.5,6.44)$,$y\in(3.4,8.92)$,$z\in(1,3.06)$。在搅拌器转动1周内,记录每个顶点位置在每个正交轴上x,y,z这3个方向的最大电场强度$E_{\max x,y,z}$,以及发射天线在搅拌器旋转1周内的平均输入功率P_i,求出8个顶点处每个电场分量对平均输入功率的归一化最大电场值:

$$\overline{E}_{x,y,z} = \frac{E_{\max x,y,z}}{\sqrt{P_i}} \tag{2}$$

分别对每个正交轴的归一化最大场强值在8个顶点位置求平均值,即:

$$(\overline{E}_x)_8 = \frac{\sum \overline{E}_x}{8},\ (\overline{E}_y)_8 = \frac{\sum \overline{E}_y}{8},$$

$$(\overline{E}_z)_8 = \frac{\sum \overline{E}_z}{8} \tag{3}$$

再对所有的(包括8个位置,每个位置3个坐标轴)归一化最大场强值求平均,即:

$$(\overline{E})_{24} = \frac{\sum \overline{E}_{x,y,z}}{24} \tag{4}$$

最后求出统计样本x,y,z各电场分量的标准偏差,即:

$$\sigma_{x,y,z} = \sqrt{\frac{\sum \overline{E}_{i\,x,y,z} - \sum \overline{E}_{x,y,z}}{8-1}} \tag{5}$$

式中:i表示测试区域的8个顶点。

计算统计样本对场强在8个位置、每个位置3个坐标轴的所有测量值的总偏差,即:

$$\sigma_{24} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{8}\sum_{n=1}^{3}(\overline{E}_{m,n} - \overline{E}_{24})^2}{24-1}} \tag{6}$$

式中:m为测试区域的8个顶点;n为每个位置的3个坐标轴分量。

利用式(5)求得x,y,z各电场分量的标准偏差,即:

$$\sigma = 20\ \lg\left(\frac{\sigma_{x,y,z} + \overline{E}_{x,y,z}}{\overline{E}_{x,y,z}}\right) \tag{7}$$

根据式(6),求得总的标准偏差,即:

$$\sigma = 20\ \lg\left(\frac{\sigma_{24} + \overline{E}_{24}}{\overline{E}_{24}}\right) \tag{8}$$

IEC 61000–4–21标准介绍了2种搅拌器的工作方式，即连续搅拌和步进搅拌。笔者采用步进搅拌方式，步进角度为7.2°，搅拌器旋转1周，经过测量，得到所选工作区域各顶点位置的场强分量最大值，见表1。

表1　工作区域的8个顶点位置电场分量最大值(仿真)

Table 1　E–field maxima in the 8 vertexes of workspace(simulation)

V·m^{-1}

位置序号	E_x	E_y	E_z
1	76.599 9	30.376 5	41.331 9
2	43.314 3	74.484 6	42.480 6
3	36.569 4	40.175 1	25.413 1
4	32.646 0	24.146 55	83.343 0
5	45.985 2	65.899 5	42.607 5
6	56.897 4	40.569 9	43.826 1
7	79.280 7	29.081 8	23.168 9
8	29.938 0	40.424 4	32.286 9
平均值	50.153 8	43.144 8	41.807 2

利用IEC 61000–4–21给出的求标准偏差的方法来判定混响室的场均匀性，标准偏差越小，说明该区域的电场越均匀。根据式(7)和式(8)，得到工作区域电场的标准偏差，见表2。

表2　测试工作区域电场的标准偏差(仿真)

Table 2　E–field deviation of the workspace(simulation)

dB

σ_x	σ_y	σ_z	σ_{24}
2.804 4	3.015 3	3.205 3	2.938 6

可以看出，总的标准偏差约为2.94 dB，低于标准的限值，说明此区域的电场均匀性符合标准。

2.2　复杂电磁环境的构建

通过以上的仿真建模，得到了一定条件的电磁环境，通过实验对其可行性及有效性进行了验证。利用军械工程学院国防科技重点实验室混响室测试系统，采用信号发生器，通过功率放大器，在混响室内构建一定的电磁环境，其实验配置如图2所示。

根据仿真试验的参数设置，测试区域与仿真建模时测试区域相同，信号发生器设置频率为100 MHz，调节功率放大器，通过天线在混响室内进行射频辐射。采用步进搅拌方式，在混响室内产生统计均匀、各向同性、随机极化的电磁环境，同时利用测量装置记录数据，得到所选工作区域各顶点位置的场强分量最大值(见表3)。

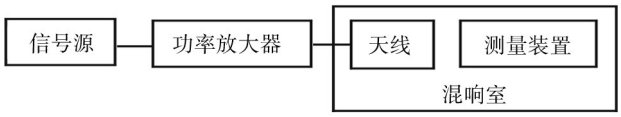


图2　实验装置配置

Fig. 2　Block diagram of experimental device configuration

表3　工作区域的8个顶点位置电场分量最大值(实验)

Table 3　E–field maxima in the 8 vertexes of the workspace (experiment)

V·m^{-1}

位置序号	E_x	E_y	E_z
1	47.031 8	63.247 0	50.011 0
2	21.538 6	23.540 1	19.893 9
3	45.280 4	38.826 6	66.334 7
4	35.285 9	53.425 8	22.389 8
5	37.222 1	64.434 2	48.811 4
6	39.080 7	43.881 2	65.961 1
7	50.187 5	27.491 0	25.648 3
8	27.959 7	33.899 2	15.360 1
平均值	37.948 3	43.593 2	39.301 3

利用IEC 61000–4–21给出的求标准偏差的方法来判定混响室的场均匀性，根据式(7)和式(8)，得到工作区域电场的标准偏差，见表4。

表4　测试工作区域电场的标准偏差(实验)

Table 4　E–field deviation of the workspace (experiment)

dB

σ_x	σ_y	σ_z	σ_{24}
1.984 3	2.651 6	3.709 5	2.836 7

由表4得到总的标准偏差约为2.84 dB，说明此区域的电场较均匀，符合标准，可以用于实验及实际应用，该复杂电磁环境仿真构建具有有效性和可行性。

3　结语

通过对复杂电磁环境对信息化战争的影响的分

析,应用模拟器仿真构建的方法,构建了一定条件下的电磁环境,并通过混响室试验系统进行电磁环境构建的验证。结果表明,复杂电磁环境仿真构建具有有效性和可行性,同时,构建的电磁环境为进一步开展武器装备复杂电磁环境效应研究奠定了基础。

参考文献:

[1] 刘尚合,孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. 装备指挥技术学院学报,2008,19(1):1—5.

[2] 程健庆,余云智. 信息化战场条件下复杂电磁环境仿真建模技术[J]. 舰船电子工程,2008,28(8):152—154.

[3] 周明军,孙宏. 装备保障训练复杂电磁环境构建探析[J]. 装备指挥技术学院学报,2009,20(2):12—14.

[4] 逯贵祯. 混响室测量技术[J]. 安全与电磁兼容,2004(3):22—24.

[5] 张成怀,魏光辉. 混响室测试区场均匀性分布规律仿真分析[J]. 高电压技术,2008,34(8):1537—1541.

[6] IEC 61000-4-21-2003, Electromagnetic Compatibility (EMC)——Part 4-21:Testing and Measurement Techniques——Reverberation chamber Test Methods[S].

(上接第20页)

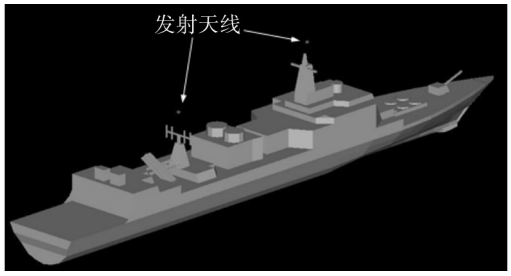


图11　舰船上发射天线位置示意

Fig. 11　Position of the transmitting antennas

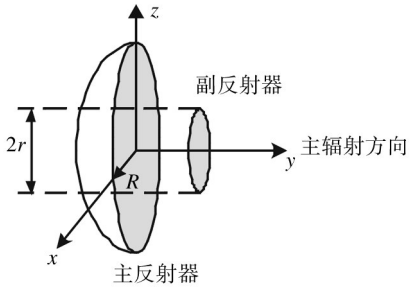


图12　抛物面反射器天线结构

Fig. 12　Configuration of parabolic reflector antenna

(结构如图11所示),主反射器半径为4 m,副反射器半径为1 m。主辐射方向是朝着舰首的方向。其他条件与上述计算相同。

图13给出了2个天线同时工作时船体表面接收的电磁波能量的大小。可以看出,舰船大部分区域都接收到了较大的辐射,但是由于喇叭天线和抛物面反射器天线都是方向性非常强的天线,所以舰船尾部接收到的能量较小。

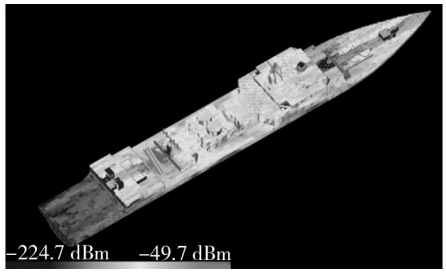


图13　2个天线同时工作时船体表面各部分接收的电磁波能量

Fig. 13　Received electromagnetic power on vessel surface under radiation of two antennas

3　结语

主要研究了大型水面舰艇在单个或者多个舰载天线辐射下的舰船表面电磁场的分布情况。计算得到了在不同天线辐射下船体表面的电场强度,给出了舰船表面各个部分接收到的电磁波能量。同时,还分析计算了在多个天线辐射下的情况,对于舰载的各种雷达和电子设备排布有着非常重要的意义。

参考文献:

[1] 张建华,李会敏. 海军舰艇编队雷达系统EMC预测分析仿真研究[J]. 舰船电子工程,2008,11(28):184—187.

[2] 王征,汤仕平,潘若恩. 现代舰船电磁环境探讨[J]. 船舶工程,2004,26(12):48—50.