

舰艇通信天线布置电磁兼容性的评估模型

张坤元 黄嵩高 郑生全 黄球

七〇一所

摘要:本文分析了舰艇上布置的通信天线的电磁兼容性基本结构、结构中的各种因素和它们之间的关系,得出了通信天线布置的电磁兼容性数学模型。该模型是从分析所布置天线的电磁兼容性特性入手,利用“船模法”测试的数据或者通过软件处理的测度数据作为数据的因素值,它比一般纯数学模型利用理论数据作为因素值要更为合理和精确。

关键词:天线布置 电磁兼容性(EMC) 评估模型

1 舰艇与天线布置

舰艇的天线布置,一直是舰艇总体设计的重点之一,也是电磁兼容性的难点之一。现代舰艇的通信天线布置通常都是用“船模法”来预测的。那么,这种“船模法”测试用哪些指标来衡量布量的效果呢?总结本课题四年来的研究成果,舰艇通信天线布置效果(或效能)应从下面几个因素来评价。

2 天线布置效能的评价因素

2.1 方向图品质

我们指的是通信天线的全向方向图,其品质好坏应该从两个方面来衡量:即圆度品质和增益品质,用公式表示为:

$$Q = CQ \times GQ \quad (1)$$

式中:

Q —全向天线的方向图品质;

CQ —全向天线的方向图圆品质;

GQ —全向天线的相对于海平面上 $\lambda/4$ 波长天线的方向图增益品质。

理想的情况应该是 $CQ=1, GQ=1$,因而 $Q=1$ 。也就是说方向图品质,既要求方向图要圆,同时还要求在全方位相对海平面上 $\lambda/4$ 天线的增益要高。实际上都不可能达到 1,根据有关资料, $Q \geq 0.6$ 就不错了。

2.2 累积增益概率

累积增益概率是某个增益以上所占方位与全方位的百分比,通常用概率——增益曲线来表示。

这项概率计算,只要方向图(含增益)测量完成,用计算机是容易实现的。实际上,这是一项很重要的天线指标之一。国外有很多舰艇天线布置要求某个增益以上,概率达到 80% 就

行。因为增益，反映了通信的距离，方位概率反映了通信的全向性，二者必须折中。

2.3 通信覆盖范围

通信覆盖范围是将所测试的天线数据，加以假设发射机、接收机、信道因子等参数来估算通信覆盖范围。

$$(S/N)_R = P_T + G_T + G_R - L - M - KTB \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

式中：

$(S/N)_R$ ——为接收机信噪比 dBW；

P_T ——为发射机功率 dBW；

G_T ——为发射天线增益 dB；

G_R ——为接收天线增益 dB；

L ——为路径损耗 dB；

M ——为设计余量 dB；

KTB ——为接收机输入端噪声功率 dBW。

可以看出公式中，只有 G_T 和 G_R 是用“船模法”测试的数据，其它参数均是按常规假定。因此，通信覆盖范围的准确度不完全靠测试确定，但它直接表示了战术技术指标，上级机关比较关注。

对全全向通信来说，通信覆盖范围的全方位概率是重要指标，它表示给定的通信距离内所能通信的方位范围，占全方位的百分比。距离越近，概率越高。

2.4 天线间隔高度 L

天线间隔高度 L 是舰艇天线布置中比较重要的指标，“船模法”测试只需用网络分析仪就可实施。它反映的是两两天线间的隔离程度，对本舰的收一发之间，发一发之间比较重要，严重不合格不仅影响收（发）不正常，甚至会导致收（发）机烧毁。但是具体型号设计中，可能要标准需要修订，也可能是具体情况不同，有时允许隔高度不合格，但不能导致接收机烧毁或发射机阻塞。

2.5 大功率发射天线的 RF 危害

主要是对武器系统的危害、燃油的危害及对人员的危害等。它是涉及生命安全问题，所以是一项极重要的指标。通常按照规范要求对武器和燃油只有合格和不合格之分，不允许有模棱两可的结论。而对人员的危害，具体型号设计有时允许部分不合格情况。

3 通信天线布置的 EMC 效能模型

所谓通信天线布置的 EMC 效能是与系统的效能含义一致的，只不过这里加了一个 EMC 领域的限制，即：所有通信天线（认为是一个系统）在舰艇特定条件下达到 EMC 的程度。因此，通信天线布置优化就是这个 EMC 效能最大，“布置优化的评价。当然就是求解 EMC 效能的问题。

3.1 天线布置的 EMC 基本结构

天线布置，大体上有三种特性，一是天线与舰艇上其它设施、人员的关系特性；二是天线本身的特性；三是天线与天线之间的关系特性。这三种特性缺一不可，它是基本结构的大方框。前面的几个因素中，RF 危害属第一类，它关系生命、安全，不考虑，天线不能执行任务。品质因素，累积增益概率和覆盖范围全方位概率都含有天线的方向图幅度、增益、驻波比等天线参数，但它们是从不同角度来评价单根天线的质量的，可以互为补充，当然属于第二类特性。第三类特性是天线间的隔离度。这三类特性组合结构如下：

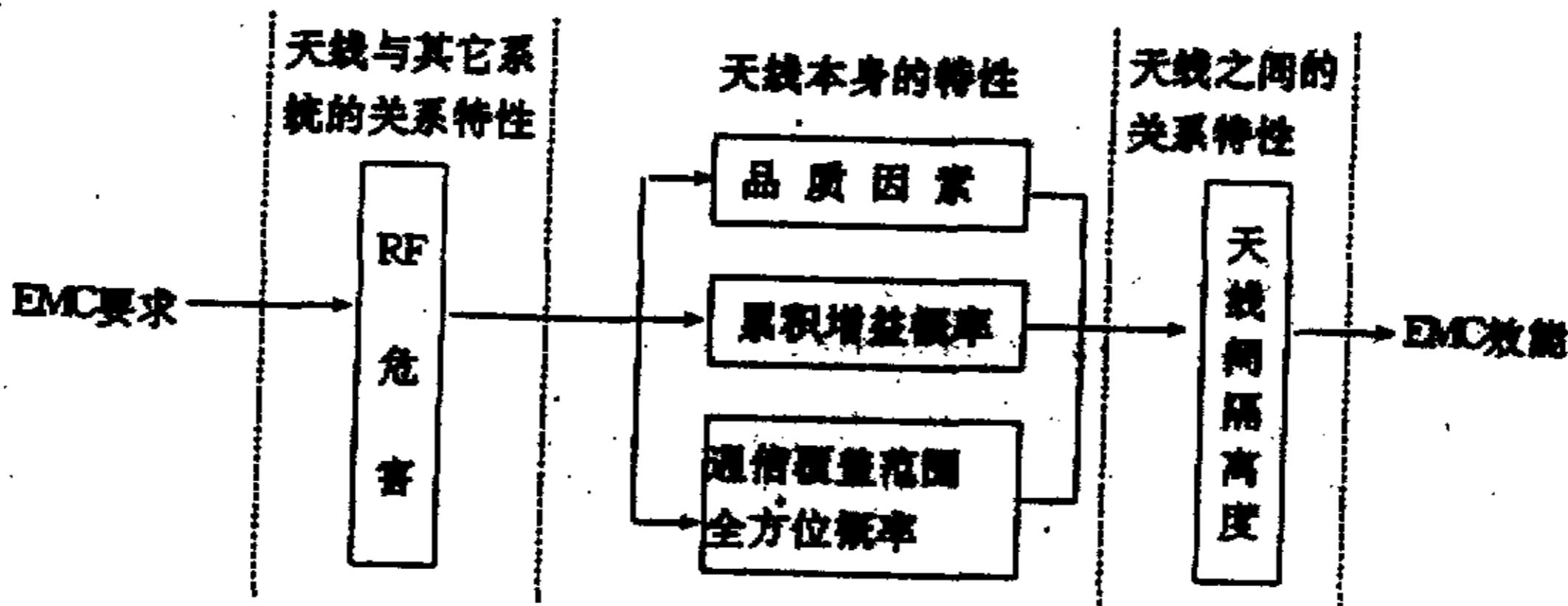


图1 规划天线布置的EMC基本结构

图1中，输入的 EMC 要求包括规范、标准及舰艇的 EMC 要求和协议。输出为 EMC 效能，或者叫 EMC 效果，评估的 EMC 特性均可。

3.2 数学模型

我们将前面上述的各个因素用数学公式表示：

·品质因素 $Q_i: Q \leq 1, Q = CQ \times GQ$ ，设有 a 个频点，为简单起见，设每个频点的权重相同，这样对频率个数平均下来，则第 i 天线：

$$Q_i = \frac{1}{a} \sum_{n=1}^a Q_{in} \quad (3)$$

·累积增益概率 P_1 ：同品质同一样，对 a 个频点第 i 天线有：

$$P_{1i} = \frac{1}{a} \sum_{n=1}^a P_{in} \quad (4)$$

·通信覆盖范围的全方位概率 P_2 ：同品质因素一样，对 a 个频点第 i 天线有：

$$Q_{2i} = \frac{1}{a} \sum_{n=1}^a Q_{2in} \quad (5)$$

·RF 危害因素 H

RF 危害包括对武器、燃油和人民的危害。设它们各自的界限值相对于测量值之比（归一化因素）为 h_w, h_f 和 h_r ，则有：

$$h_w = \frac{h_{w0}}{h_w} \quad h_o = \frac{h_{o0}}{h_o} \quad h_r = \frac{h_{r0}}{h_r}$$

式中：

h_{w0}, h_{o0}, h_{r0} ——分别为对武器、燃油和人员的界限值；

h_w, h_o, h_r ——分别为对武器、燃油和人员的测量值。

这样：对武器和燃油：

$$h_w = \frac{h_w}{h_{w0}} \leq 1 \text{ 为不合格, 令 } h_w = 0; h_w = \frac{h_w}{h_{w0}} > 1 \text{ 为合格, 令 } h_w = 1.$$

$$h_o = \frac{h_o}{h_{o0}} \leq 1 \text{ 为不合格, 令 } h_o = 0; h_o = \frac{h_o}{h_{o0}} > 1 \text{ 为合格, 令 } h_o = 1.$$

而对人员，在现有国情下，有时允许有一定的不合格，所以保留不合格的值：

$$h_r = \frac{h_r}{h_{r0}} \leq 1 \text{ 为不合格, 而当 } h_r = \frac{h_r}{h_{r0}} > 1 \text{ 为合格, 令 } h_r = 1.$$

这三者之间是串联关系。设有 m 个武器、 g 个燃油区、 q 个人员岗位，在 β 号频点，则有第 i 天线的 RF 危害 H_i ：

$$H_i = \prod_{j=1}^m h_{wj} \cdot \prod_{k=1}^g h_{ok} \cdot \prod_{l=1}^q h_{rl} \quad (6)$$

式中：

h_{wj} ——表示在 β 号频点第 j 号天线的 RF 危害；

h_{ok} ——表示在 β 号频点第 k 号天线的 RF 危害；

h_{rl} ——表示在 β 号频点第 l 号燃油区的 RF 危害；

h_{rl} ——表示在 β 号频点第 l 号人员岗位的 RF 危害；

设有 b 个频点，则：

$$H_i = \prod_{p=1}^b H_{ip} \quad (7)$$

式中：

H_i ——为第 i 号天线总的 RF 危害因素。

·天线隔离度因素 L

设第 i 天线与第 j 天线之间的隔离度相对于所要求的隔离值之比（归一化因素）即 L_{ij} ，则

$$L_{ij} = \frac{L_i}{L_j}$$

式中：

L_{ij} ——为第 i 天线与第 j 天线的隔离度归一化因素；

L_i ——为第 i 天线与第 j 天线的隔离度测量值；

L_j ——为规定所要求的隔离度倍数。

对于 i, j 都是接收天线，则不存在隔离度，所以令 $L_{ij} = 1$ 。而对收一发和发一发天线，则有

类似于上述对人员 RF 危害的规律,所以:

$$L_i = \frac{L_i}{L_0} \geq 1$$

为合格,令 $L_i = 1$ 。

而 $L_i = \frac{L_i}{L_0} < 1$ 为不合格,保留。

对第 i 天线总的隔离度因素为两个天线隔离度的乘积(因为不允许发一发、发一收之间无隔离度)。测量是用扫频测量的,因而每个隔离度都是在天线的工作频段内测的,公式中不需要反应。设有 n 根天线,则:

$$L_i = \prod_{j=1}^{n-1} L_j \quad (8)$$

式中:

L_i ——第 i 天线的总隔离度因素。

综上所述第 i 天线的 EMC 效能为 E_i :

$$E_i = \frac{1}{3} H_i (Q_i + P_{1i} + P_{2i}) L_i \quad (9)$$

n 根天线总的 E 为:

$$E = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N E_i \quad (10)$$

所谓天线布置最优,在天线根数 n 不变的情况下总的 E 为最大,即:

$$E_m = \max \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N E_i \quad (11)$$

从公式(9)可以看出,只要 RF 危害不合格即 $H_i = 0$,认为不兼容;同样有离天线无隔离度(发一发和发一收),即 $L_i = 0$ 也认为不能兼容。而 Q_i 、 P_{1i} 和 P_{2i} 只有天线失效,损坏才可能全部为零,只要有一项存在,总可以有一定 EMC。通常 Q_i 、 P_{1i} 和 P_{2i} 这三项有一定的内在联系,不可能一项很好,其余两项为零。

从公式(3)~(11),也可以看出,每根天线的 E_i 及 n 根天线的总 E ,几乎不可能为 1 和 n。这是因为 RF 对人员的危害从隔离度有时允许不合格存在,即使全部合格,但 Q_i 、 P_{1i} 、 P_{2i} 是理想值为 1。也就是说,实际测试后,其结果一般都小于 1,至于小多少,较为设计合理,还要靠今后在型号测试中实际验证,现在拿出一个主观的值太早。但不管怎样, E_i 接近于 1 好,等于 1 就是 100% 的满足要求,其最大值为 1,而最小值为零。

为了比较舰艇之间的 EMC 效能,可以将 n 根天线的总 E 进行平均,即:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} E \quad (12)$$

有了以上模型,就可以比较综合地评价舰艇天线布置的 EMC 问题了。当然这个模型是我们首次提出,是否正确,还有待实践的检验。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>