

# 舰船缩尺模型天线(短波)近场自动测试系统

Scale Model Antenna (Shortwave) Automatic Test System of Ship in Near-field

电磁兼容性国防科技重点实验室 张嘉 郑生全 黄松高 刘义 张艳

## 摘要

介绍了舰船缩尺模型天线(短波)近场自动测试系统,设计出了一套舰船缩尺模型近场的测试方法,为研究舰船近场场强分布提供了试验依据,同时此系统还可用于武备及人员安全性方面的研究。

## 关键词

舰船电磁兼容; Agilent VEE Pro; 校准系统; 测试系统

## Abstract

It introduces the Scale model antenna(shortwave) automatic test system of ship in near-field in paper. By this it designs a test method of scale model of ship in near-field, provides methods for the research of electrical field strength distribution and of the security of weapon and people.

## Keywords

electromagnetic compatibility of ship; Agilent VEE Pro; calibration system; test system

## 1 引言

许多大功率且产生高场强的射频、微波发射设备,如中波、短波通信发射设备、雷达发射设备、电子战发射设备等陆续装舰,这些大功率的电子设备主要是由于其相应的天线系统安装在舰艇的上层金属结构上,对外辐射电磁能量,而在其周围形成比较高的辐射近场,致使舰艇甲板上的电磁环境较为复杂。舰上许多高灵敏度接收设备,如通信接收机、雷达接收机、侦察接收机等,容易受到强的环境电磁场的干扰甚至烧毁;另外,舰艇上电引爆武器设备,如导弹、无源干扰弹、电引信火炮等,在高功率射频环境场强下,都存在着误引爆的严重安全隐患;舰上的燃油加注口、污油排放口及储存位置处的射频场强如果过高,引起的电弧放电或电磁火花等,均可能使其着火燃烧或使气体发生爆炸;大功率的电磁环境对工作人员的生理状况也将产生不同程度的影响,使人注意力分散、易疲劳等。

因此,舰艇设计过程中,要根据各种不同的射频、微波发射设备在舰艇条件下产生的近场场强分布,合理布置各种发射天线和相关的易敏感设备,除了保证全舰的电磁兼容性,提高舰艇的作战能力外,还应对人员、武备及燃油的安全性提供保障。舰船缩尺模型天线(短波)近场自动测试系统就是在这样的背景下开发的。

## 2 自动测试系统功能需求

缩尺模型天线(短波)近场自动测试系统利用总线

技术将接收、控制、发射(注入)各单元联接在一起、协调一致地运行来完成缩尺模型近场测试功能。可以提高测试精度和测试效率。

要实现缩尺模型近场自动测试就要首先实现计算机对相关仪器仪表的自动控制,以下两个条件必须得到保证:

(1) 相关的仪表(如接收机或频谱仪、信号源)必须具备与IEEE488总线兼容的接口,并提供该仪表的指令控制集。

(2) 选用恰当的接口卡和开发语言,可以简化编程,对界面的友好性及程序的可移植性等方面提供方便。缩尺模型天线(短波)近场自动测试软件选用Agilent VEE Pro作为开发平台,此平台的优势有两方面:

● 简捷明快的编程方法。Agilent VEE系列平台均采用图形界面编程方式,使用起来简单方便。

● Agilent VEE支持Agilent公司的各种测量仪器,备有许多仪器的驱动文件,包括Agilent的信号源系列产品、示波器系列产品、频谱仪系列产品、网络分析仪系列产品等。

另外系统不仅要能完成自动测试功能,还要求对测试数据进行自动分析处理,其中的计算、判断等功能均需要在无人工干预情况下自动完成。

## 3 系统组成

### 3.1 校准系统硬件组成

校准系统由Agilent8712B网络分析仪、QF4003双定

向耦合器、计算机、GP-IB接口卡组成。分为三个部分：通路电缆损耗测量系统、入射回路电缆损耗测量系统、天线反射率测量系统。

### 3.2 测量系统硬件组成

测量系统由Agilent8712B网络分析仪、Agilent8563E频谱分析仪、50W功率放大器、光纤场强仪、QF4003双定向耦合器、计算机、GP-IB接口卡组成。

测量系统框图如图1所示。

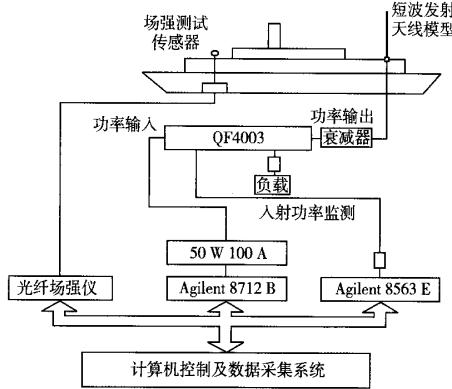


图1 舰船短波天线辐射近场场强模型自动测量系统框图

## 4 模型天线理论

设原天线的电磁场分别为 $E$ 和 $H$ ,坐标为 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ,时间为 $t$ ,介质的参数为 $\epsilon$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$ ;模型天线的电磁场分别为 $E_1$ 和 $H_1$ ,坐标为 $X_1$ 、 $Y_1$ 、 $Z_1$ ,时间为 $t_1$ ,介质参数为 $\epsilon_1$ 、 $\mu_1$ 、 $\sigma_1$ ,原天线尺寸为模型天线尺寸的 $n$ 倍,则两天线有如下关系:

$$\begin{aligned} X &= nX_1, \quad Y = nY_1, \quad Z = nZ_1 \\ E &= aE_1, \quad H = bH_1, \quad t = ct_1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为待定比例系数,则有:

$$\begin{aligned} \nabla &= i\frac{\partial}{\partial x} - j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{n}(i\frac{\partial}{\partial x_1} - j\frac{\partial}{\partial y_1} + k\frac{\partial}{\partial z_1}) = \frac{1}{n}\nabla_1 \quad (2) \\ \frac{\partial H_1}{\partial t_1} &= \frac{c}{b}\frac{\partial H}{\partial t}, \quad \frac{\partial E_1}{\partial t_1} = \frac{c}{a}\frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

由于原天线和模型天线都应该满足麦克斯韦方程,则:

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} - \sigma E \quad (4)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla_1 \times E_1 = n \nabla \times \frac{1}{b}H = \epsilon \frac{na}{bc} \frac{\partial E_1}{\partial t_1} + \sigma \frac{na}{b}E_1 \quad (6)$$

$$\nabla_1 \times E_1 = n \nabla \times \frac{1}{a}E = -\mu \frac{nb}{ac} \frac{\partial H_1}{\partial t_1} \quad (7)$$

可见,要使模型天线的电磁场分布与原尺寸天线具

有相同的形式,必须使式(4)、式(5)与式(6)、式(7)具有相同的形式,即:

$$\sigma_1 = \sigma \frac{na}{b} \quad (8)$$

$$\mu_1 = \mu \frac{nb}{ac} \quad (9)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon \frac{na}{cb} \quad (10)$$

由于原天线与模型天线均在空气中制造和进行研究,且采用相同的电磁单位,则:

$$a=b \quad \epsilon=\epsilon_1 \quad \mu=\mu_1 \quad (11)$$

由式(8)~式(11),可得:

$$n=c \quad \sigma_1 = n\sigma \quad (12)$$

由以上可以看出,如果把天线的尺寸缩小 $n$ 倍,为了保持与原天线的相似性,应该把周期减小 $n$ 倍(或把频率提高 $n$ 倍),把制造模型天线的材料的电导率提高 $n$ 倍,由于原天线与模型天线的材料均为良导体的金属,其辐射功率远大于损耗功率,可以忽略因不增大电导率而引入的误差。原天线与模型天线的各量之间的关系如表1所示。由于天线的场分布特性与边界条件密切相关,因此,在制造模型天线时,为得到与原天线有相同的场分布,必须对影响天线特性的周围环境进行模拟。

表1 模型天线与原天线量间的相互关系

参数	模型天线	原天线	模型天线与原天线量间相互关系
增益函数	$g_1(\theta, \phi)$	$g(\theta, \phi)$	$g_1(\theta, \phi) = g(\theta, \phi)$
长度	$l_1$	$l$	$l_1 = l/n$
时间	$t_1$	$t$	$t_1 = t/n$
电场	$E_1$	$E$	$E_1 = E/a$
磁场	$H_1$	$H$	$H_1 = H/b$
电压	$u_1$	$u$	$u_1 = u/na$
电流	$I_1$	$I$	$I_1 = I/nb$
频率	$f_1$	$f$	$f_1 = nf$
波长	$\lambda_1$	$\lambda$	$\lambda_1 = \lambda/n$
阻抗	$Z_1$	$Z$	$Z_1 = Z$
总功率	$P_1$	$P$	$P_1 = P/abn^2$

## 5 自动测试系统功能设计与实现

### 5.1 测试流程 (见图2)

针对图2测试流程以及系统功能需求和硬件组成,我们通过软件编程来逐一实现自动测试。

### 5.2 完全由用户定义的参数设置功能和测试内容选择功能

在校准测试中,我们使用Agilent8712B网络分析仪来进行信号发射和数据采集工作。在软件运行前,用户可

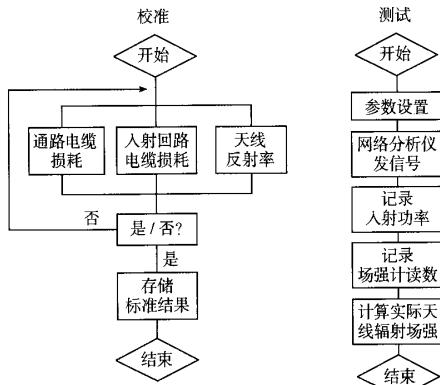


图2 自动测试系统测试流程图

以根据需要自由设置校准时的各项参数,这些参数在软件运行后会自动送到网络分析仪中,使其按照用户的校准测试要求进行工作。

校准测试包括三项内容:通路电缆损耗测量、入射回路电缆损耗测量以及天线反射率测量。用户可以根据需要按任意顺序选择相应的测试内容(见图3)。由于三项校准测试内容的硬件组成略有不同,因此在用户选择了相应的测试内容后,软件会等待用户连接好仪器、电缆等硬件设备后再进行测量,具有一定的人性化功能(见图4)。

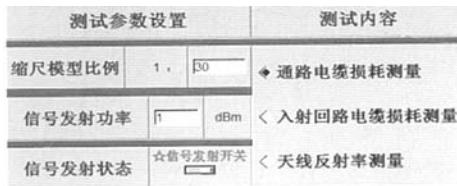


图3 校准测试参数设置及测试内容选择界面

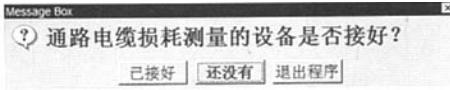


图4 软件等待用户连接硬件设备

### 5.3 对 Agilent8712B 网络分析仪的自动控制

这项功能是整个校准测试软件的核心,由于校准测试完全由网络分析仪来发射和采集信号,因此对网络分析仪的进程控制决定整个软件的总体性能。

按照测试要求,网络分析仪需要完成信号发射、信号接收、对测试频率幅值进行捕捉、输出等主要功能,这些通过软件进程控制均可以自动完成,另外,在接收信号后网络分析仪还可以完成自动AutoScale以及自动Average功能。

在校准测试的三项内容中,通路电缆损耗和入射回

路电缆损耗测量是传导测量,而天线反射率测量是反射测量,因此软件处理三项测试内容时不能简单地进行循环判断,而是需要对网络分析仪加入自动转换控制功能(见图5),通过加入一个逻辑判断,针对不同测试内容自动对网络分析仪进行不同的设置。网络分析仪对天线反射率测试的输出结果为驻波比,软件将其自动转换为天线反射率,并以数据文件的形式输出存盘,在自动测试及数据处理软件中将对其进行后期的调用处理。

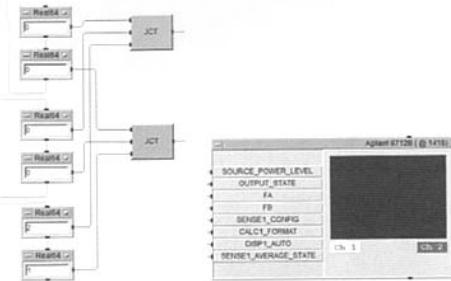


图5 软件实现网络分析仪传导、反射功能自动转换

### 5.4 测试完毕后对网络分析仪的复位处理

由于网络分析仪在整个测试过程中充当信号源进行信号发射,从安全角度考虑,软件设计上实现了一项测试内容测试完毕后或软件意外中断时关闭网络分析仪信号发射的功能,使人员和设备的安全性得到更高的保障(见图6)。

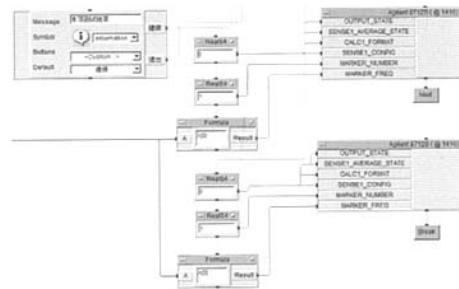


图6 网络分析仪的复位功能设计

### 5.5 对 Agilent8563E 频谱分析仪的自动控制

测试过程中,网络分析仪所发射的功率值不能直接看出,需要使用双定向耦合器和频谱分析仪监测入射回路信号幅值,然后通过被测天线反射率计算出发射功率值。频谱分析仪的控制设计界面如图7所示,由用户设置的频率配置文件来控制频谱仪的中心频率、扫描带宽以及分辨率带宽,频谱仪采集到信号后根据用户定义的测试频率逐一进行捕捉并将对应幅值以数据文件的形式输出存盘。

(下转第98页)

合成不确定度：

$$\begin{aligned} u_c^2 = & c_1 u_r^2 + c_2 u_l^2 + c_3 u_{lf}^2 + \\ & c_4 u_{\delta m}^2 + c_5 u_{\delta z}^2 + c_6 u_{\delta v_{sw}}^2 + \\ & c_7 u_{\delta v_{pa}}^2 + c_8 u_{\delta v_{pr}}^2 + c_9 u_{\delta v_{nf}}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

相对的合成不确定度：

$$\begin{aligned} \left(\frac{u_c}{v}\right)^2 = & c_1 \left(\frac{u(v_r)}{v}\right)^2 + c_2 \left(\frac{u(l_c)}{v}\right)^2 + \\ & c_3 \left(\frac{u(lf)}{v}\right)^2 + c_4 \left(\frac{u(\delta m)}{v}\right)^2 + c_5 \left(\frac{u(\delta z)}{v}\right)^2 + \\ & c_6 \left(\frac{u(\delta v_{sw})}{v}\right)^2 + c_7 \left(\frac{u(\delta v_{pa})}{v}\right)^2 + \\ & c_8 \left(\frac{u(\delta v_{pr})}{v}\right)^2 + c_9 \left(\frac{u(\delta v_{nf})}{v}\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

将式(9)代入式(11)可得：

$$\begin{aligned} u_{rel}^2 = & \left(\frac{u(v_r)}{v_r}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{u(l_c)}{l_c}\right)^2 + \left(\frac{u(lf)}{lf}\right)^2 + \\ & \frac{1}{4} \left(\frac{u(\delta m)}{\delta m}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{u(\delta z)}{\delta z}\right)^2 + \left(\frac{u(\delta v_{sw})}{\delta v_{sw}}\right)^2 + \end{aligned} \quad (12)$$

(上接第42页)

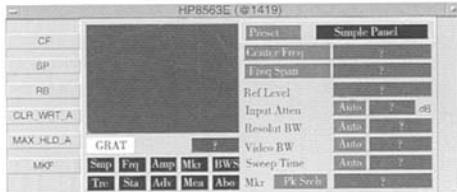


图7 Agilent 8563E频谱分析仪的控制设计界面

## 5.6 场强修正系数的自动计算功能

通过校准软件我们可以得到需要测试频率的通路电缆损耗值、入射回路电缆损耗值以及所对应天线的反射率，通过自动测试模块可以得到发射功率的监测值，这些数据均已经以数据文件的形式保存到数据库中，在自动计算模块中，用户自行选择、调入参与计算的相应数据文件，软件将按照编写好的公式自动完成整个计算过程，得到需要测试的各个频率的场强修正系数，最后用这个系数修正光纤场强计采集到的场强值即可得到最终场强测试值。场强修正系数计算公式如图8所示，其中a为通路电缆损耗值，b为入射回路电缆损耗值，c为天线反射率，d为发射功率监测值，e为循环参数。

## 5.7 自动生成报告功能

自动计算模块得到的最终结果将同样以数据文件的形式输出存盘，同时根据用户需要还可以自动生成基于Excel表格的报告，其中包括参数设置情况说

$$\begin{aligned} \left(\frac{u(\delta v_{pa})}{\delta v_{pa}}\right)^2 + \left(\frac{u(\delta v_{pr})}{\delta v_{pr}}\right)^2 + \left(\frac{u(\delta v_{nf})}{\delta v_{nf}}\right)^2 = \\ u_{rel}^2(v_r) + \frac{1}{4} u_{rel}^2(l_c) + u_{rel}^2(lf) + \\ \frac{1}{4} u_{rel}^2(\delta m) + \frac{1}{4} u_{rel}^2(\delta z) + u_{rel}^2(\delta v_{sw}) + \\ u_{rel}^2(\delta v_{pa}) + u_{rel}^2(\delta v_{pr}) + u_{rel}^2(\delta v_{nf}) \end{aligned}$$

因此，计算相对合成不确定度时，灵敏系数应该由相应输入量在数学模型中的权重决定。

## 参考文献

- [1] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-GL 07: 2006 电磁干扰测量中不确定度的评定指南[M]. 北京:中国合格评定国家认可委员会,2006.
- [2] 中国计量科学研究院. JJF 1059—1999 测量不确定度的评定与表示[S]. 北京:中国计量出版社,1999.
- [3] 国防科工委计量军标秘书处. GJB 3756—99 测量不确定度的表示与评定[S]. 北京:总装备部军标出版社,1999.

编辑:刘青 E-mail: liuqing@cesi.ac.cn

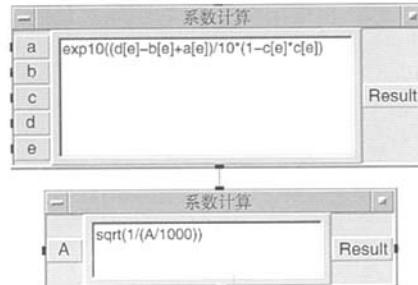


图8 场强修正系数计算公式

明(包括测试人员、地点、时间等信息)以及最终测试数据。

## 6 结语

舰船缩尺模型天线(短波)近场自动测试系统经过实际应用，证明具有较强的实用性和可操作性，实现了舰船缩尺模型的自动测试，可以为进一步研究舰船近场场强分布以及综合场强分布等问题提供真实可靠的试验依据。

## 参考文献

- [1] 周开基,赵刚. 电磁兼容原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2003.
- [2] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2001.

编辑:刘青 E-mail: liuqing@cesi.ac.cn

## 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](http://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](http://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](http://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>