

文章编号: 1672-2892(2012)03-0295-05

## 微波暗室静区性能仿真预测方法

洪丽娜<sup>1,2</sup>, 何洪涛<sup>2</sup>, 郝晓军<sup>1,2</sup>, 周 波<sup>2</sup>

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应重点实验室, 河南 洛阳 471003; 2. 中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:** 为了有效预测微波暗室的静区性能, 使用 FEKO 软件进行任意入射角度条件下角锥吸波材料的前向反射率仿真, 并以某矩形暗室结构为例, 利用吸波材料反射率仿真结果, 采用射线追踪法计算了发射天线位于天线阵面上典型位置时暗室静区内反射电平的分布情况。经比较, 仿真结果与实际测量结果一致性较好, 该方法为微波暗室性能预测提供了有效手段。

**关键词:** 暗室; 吸波材料; 反射率; 反射电平; 静区; 性能; 仿真预测

**中图分类号:** TN955<sup>+</sup>.1

**文献标识码:** A

## Quiet zone performance analysis based on simulation

HONG Li-na<sup>1,2</sup>, HE Hong-tao<sup>2</sup>, HAO Xiao-jun<sup>1,2</sup>, ZHOU Bo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics & Information System, Luoyang Henan 471003, China;  
2. Unit 63892 of PLA, Luoyang Henan 471003, China)

**Abstract:** The reflection parameters of absorbers used in the anechoic chamber were simulated in FEKO software under any angle in order to forecast the property of the anechoic chamber effectively, and to map out rational structure design. Using the simulation result of the reflection parameter and ray tracing method, the reflection level of the quiet zone in a rectangle anechoic chamber was calculated while the transmitting antenna was placed on typical position. The simulation result was in good accordance with the test result. This study has provided a useful method for predicting the quiet zone performance of microwave anechoic chamber.

**Key words:** anechoic chamber; absorber; reflectivity; reflection level; quiet zone; performance; simulation and forecast

常用的电波暗室性能预测方法分为两类: 高频法和低频法。高频法主要为光学射线追踪法, 计算简单, 由于不考虑散射等电磁传播特性, 适用于比较粗略的估算; 低频法主要包括各类全波分析数值计算方法, 计算精确度高, 但运算量较大, 对于电大尺寸结构需要大型工作站, 甚至专用大型机<sup>[1]</sup>。本文将仿真任务进行分解, 采用数值计算方法进行吸波材料的反射率仿真, 再采用射线追踪法计算暗室静区反射电平, 从而降低建模和计算的复杂度, 实现静区性能的仿真预测。

### 1 吸波材料反射率仿真

吸波材料的反射率是衡量吸波材料性能的关键指标, 其定义为: 在相对于吸波材料的空间参考点处, 平面波反射功率密度与入射功率密度之比, 通常用分贝表示<sup>[2]</sup>。对于大体积角锥吸波材料, 由于很难满足远场测量条件, 实验室通常只能测量垂直入射条件下的反射率, 斜入射条件下的前向任意角度反射率很难准确测量。因此, 考虑在对吸波材料的介质参数进行测量的基础上, 使用电磁场分析软件, 利用计算电磁学理论进行吸波材料在任意入射角度条件下的反射率仿真。

#### 1.1 仿真实验原理

##### 1.1.1 拱形法

根据 GJB 5239-2004 《射频吸波材料吸波性能测量方法》, 射频吸波材料反射率测量的拱形法测量原理规定,

被试品放置在金属板面上测得的反射电平与只有金属板时的反射电平之比,以分贝表示,即为吸波材料的反射率。因此,只要得到相同测量条件下的远场反射功率密度对比数据就可以推算出吸波材料的反射率<sup>[3]</sup>。

### 1.1.2 RCS 法

GJB 2038-1994《雷达吸波材料反射率测量方法》中规定雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量法为用标准铁板作为定标体,同一尺寸金属板为衬底的平板吸波材料的雷达散射截面积,与金属板的雷达散射截面积之比,以分贝表示,即为吸波材料的反射率。

根据雷达方程:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi R^2)^2} \quad (1)$$

式中:  $P_r$  和  $P_t$  分别为天线接收和发射功率;  $G_t$  为发射天线增益;  $\sigma$  为目标散射面积;  $A_e$  为接收天线有效面积;  $R$  为天线到目标距离。

在其他条件不变的情况下,接收功率之比等于目标 RCS 之比,即:

$$\frac{P_{r1}}{P_{r2}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (2)$$

因此,垂直入射条件下,反射率为后向散射率,可使用标准铁板作为定标体,通过 RCS 的比值计算角锥吸波材料的反射率。

## 1.2 基于 FEKO 的仿真实验设计

### 1.2.1 仿真的一般过程

FEKO 是 ANSYS 公司出品的一款专业电磁场分析软件,使用该软件进行仿真的主要工作集中在建模、网格剖分、计算参数及条件设置。主要过程如下<sup>[4]</sup>: a) 几何建模、模型处理及网格划分; b) 求解参数设置,包括对激励源类型、电磁波入射方向、接收天线方向图文件等进行设置; c) 进行求解计算; d) 将计算结果保存并对结果进行处理、显示。

### 1.2.2 关键问题分析

参照有关国军标中规定的方法进行仿真实验模拟,不仅可以保证仿真实验原理的正确性,而且可以简化数据处理过程。下面根据国军标的要求,对使用 FEKO 软件进行仿真实验设计需要解决的关键问题进行分析。

a) 收发天线间的耦合。依据 GJB 5239-2004 和 GJB 2038-1994 要求,测量要满足自由空间远场条件,不能满足远场条件时,要在收发天线之间增设屏蔽材料,比如放置吸波墙。由于在小入射角条件下,吸波材料反射率采用垂直入射时数据所增加的误差很小,因此,考虑暗室的结构和静区位置的相对关系,对暗室各壁面主反射区的反射电磁波入射角进行计算,根据最小入射角度设置测量时收发天线间的最小测试角度,并通过增加测试距离的方法拉开收发天线的间隔距离,减小天线间耦合,这种方法可以在计算精确度要求不太高的情况下,减少计算量。

b) 垂直入射条件下反射率仿真。吸波材料反射率仿真的关键环节就是如何进行仿真实验设计。拱形法是实验室中测量斜入射条件下吸波材料前向反射率的首选方法,测量过程中根据入射角度,沿拱形架调整收发天线相对位置,垂直入射条件下使用特殊装置,如环行器,使用同一个天线进行发射和接收。但是根据该软件的功能,收发天线不能放置在同一位置或方向,否则仿真中无法进行收发隔离,因此在垂直入射条件下,使用 RCS 法进行仿真实验。

## 1.3 关键模型建模

a) 材料模型。材料几何建模使用 FEKOCAD,尺寸设置与实际尺寸相同,材料整体为 4 个正四棱锥与 1 个正六面体底座的组合体。锥顶到底面的垂直距离为 36 inch; 底座高为 6 inch; 顶角为 20°, 其介质参数根据测量数据设置。

b) 金属反射板模型。铁板材料模型为理想金属,面积与材料底面积相同,边长为 24 inch,厚度为 2 mm。

c) 发射天线模型。采用喇叭天线,方向图见图 1。

d) 解算模型。喇叭天线采用电压源激励,采用面剖分,用矩量法计算;收发天线均设置为水平极化;

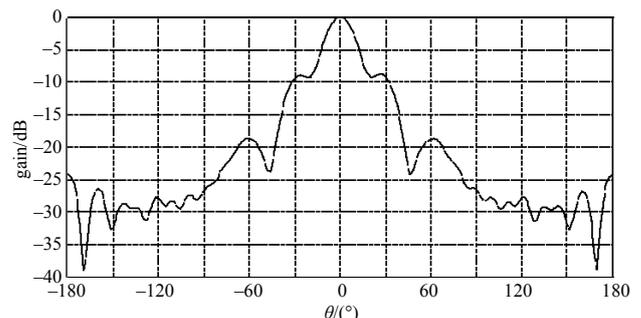


Fig.1 Pattern of horn antenna at 2 GHz  
图 1 2 GHz 喇叭 E 面方向图

接收天线使用预先存储的天线方向图文件;平板采用一致性几何绕射理论方法;吸波材料采用体剖分之后,用有限元方法计算。

### 1.4 吸波材料电参数测量

常用的吸波材料电参数测量方法有波导法和同轴线法。根据 GJB 5239-2004《射频吸波材料吸波性能测试方法》中的对于同轴线法测量吸波材料反射率的要求,选择同轴线法进行宽频带扫频测量,并且用波导法进行个别频段比对测量<sup>[5]</sup>,测试结果见图 2。

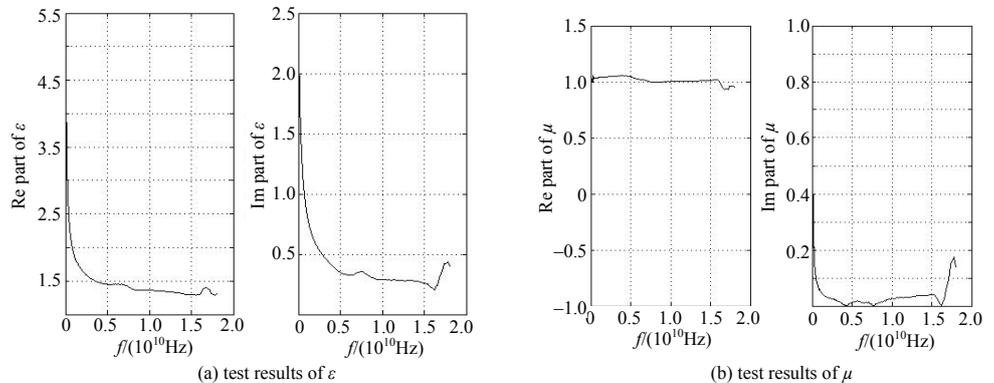


Fig.2 Measured parameters of absorber  
图 2 吸波材料电参数测量结果

### 1.5 仿真实验

仿真中介质参数根据实际测量结果设置,接收天线使用事先预存的方向图文件进行理想接收。

#### 1.5.1 仿真过程

仿真过程见图 3 和图 4。图 3 为垂直入射时吸波材料反射率仿真;图 4 为斜入射时吸波材料前向反射率仿真,剖分后的吸波材料置于坐标原点。

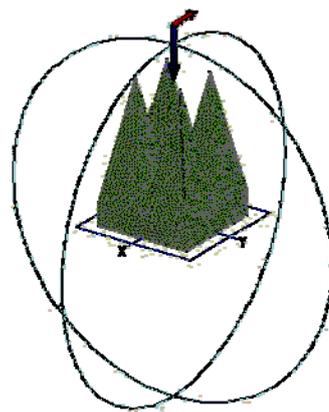


Fig.3 Simulation of reflectivity at perpendicular incident angle  
图 3 垂直入射时吸波材料反射率仿真

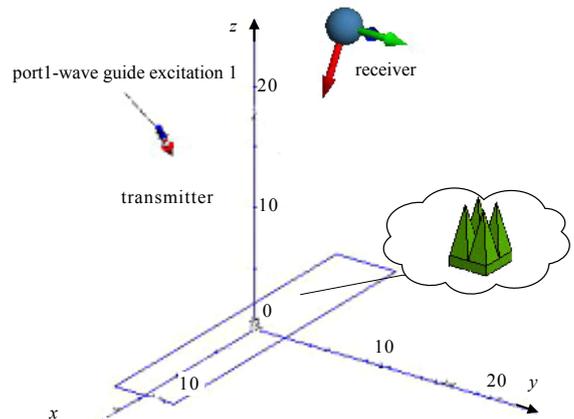


Fig.4 Simulation of reflectivity at oblique incident angle  
图 4 斜入射时吸波材料反射率仿真

#### 1.5.2 仿真结果

由于吸波材料为色散材料,不同频点的介质参数不同,仿真中不宜进行扫频,为此,在计算机性能允许的情况下,选择典型频点进行仿真,部分仿真结果见表 1。

为了减少计算量,可以得到某些入射角度的反射率之后进行插值,推算任意入射角条件下的前向反射率。

## 2 静区反射电平仿真

### 2.1 仿真方法

严格地说,计算电磁波的散射场相当复杂,基于几何光学理论的射线追踪法作为一种既方便又有效的近似计算方法,长期以来在微波暗室的工程设计中被普遍使用<sup>[6]</sup>。应用几何光学射线追踪法来解算微波暗室的问题,必须假定粘贴有吸波材料的暗室内壁(包括天花板和地面)对于入射的电磁波来说呈现“镜面”反射特性,也就是说,电磁波入射到吸波材料上之后,一部分能量被吸波材料吸收,另一部分能量沿着几何光学的镜面反射方向进行传播。假设入射电场为  $E_i$ , 反射电场为  $E_r$ , 则吸波材料的反射率为:

表 1 反射率仿真结果

Table1 Simulation results of reflectivity			
angle	$f(10^9\text{Hz})$	reflectivity/dB	
		sim results	factory data
0°	1.21	-36.55	-50<*<-42
	2.02	-49.92	-50<*<-42
15°	1.21	-27.68	Non
	2.02	-52.54	Non
30°	1.21	-23.00	Non
	2.02	-43.34	Non
45°	1.21	-12.09	Non
	2.02	-26.82	Non
60°	1.21	-1.70	Non
	2.02	-9.22	Non

$$R = 20 \log \frac{E_r}{E_i} \quad (3)$$

2.2 静区反射电平计算模型

图5为发射电磁波经暗室壁面的反射示意图,发射天线位于A点,静区内的观察点为B点,暗室壁面的反射点为C点。

假设发射天线的发射功率为 $P_t$ ,增益为 $G_t$ ,归一化的方向性函数为 $f(\theta, \phi)$ ,其中 $\theta$ 和 $\phi$ 分别是天线方位角和俯仰角,发射天线的最大辐射方向对准静区中某观察点,则由发射天线直接到达静区的电场为:

$$E_d = \sqrt{\frac{30P_t G_t}{r_d}} e^{-jk r_d} \quad (4)$$

式中 $r_d$ 为发射天线与观测点的直线距离。

发射电磁波经过暗室内第*i*个壁面反射到达静区中观察点电场为:

$$E_{ri} = \sqrt{\frac{30P_t G_t F(\theta, \phi)}{(r_{i1} + r_{i2})}} e^{-jk(r_{i1} + r_{i2})} A_0 e^{j\phi} \quad (5)$$

式中: $r_{i1}$ 为发射天线与反射点之间的距离; $r_{i2}$ 为观测点与反射点之间的距离; $A_0$ 为暗室壁面反射率的幅度; $\phi$ 为暗室壁面反射率的相位。

静区反射电平为<sup>[7]</sup>:

$$\xi = 20 \log \left| \frac{\sum E_{ri}}{E_d} \right| \quad (6)$$

式中 $\sum E_{ri}$ 为各壁面反射电场的矢量和。

暗室壁面反射率近似为暗室所用吸波材料的反射率<sup>[8]</sup>,对于垂直入射的情况,一般有厂家提供的数据可以利用,有时厂家也提供其他典型入射角的反射率,但不是所有的入射角都有数据可供利用,而且提供的只是出厂抽检数据。

2.3 仿真实验

2.3.1 仿真条件设置

假设某矩形暗室结构见图6,选择阵面上H点、U点、D点和W点为发射天线典型位置。仿真坐标系见图6中X,Y,Z轴方向,原点位于暗室一角。静区位于平台室上方,平台室表面铺设吸波材料,仿真中考虑平台室的遮挡和反射效应。

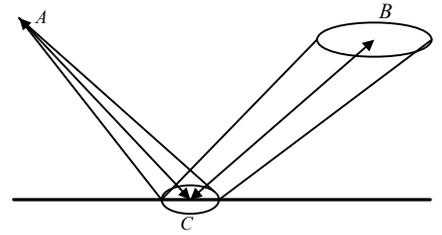


Fig.5 Sketch map of electromagnetic wave colliding with the wall of the chamber  
图5 经微波暗室壁面的反射波示意图

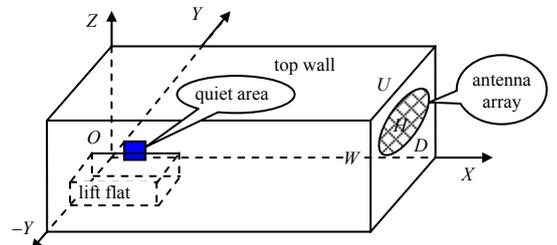
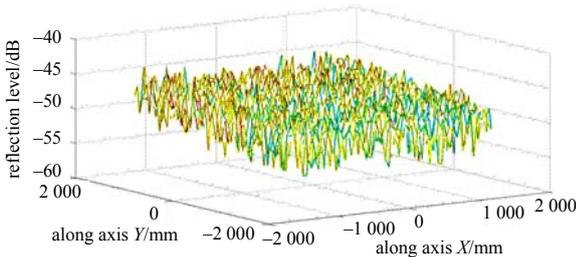
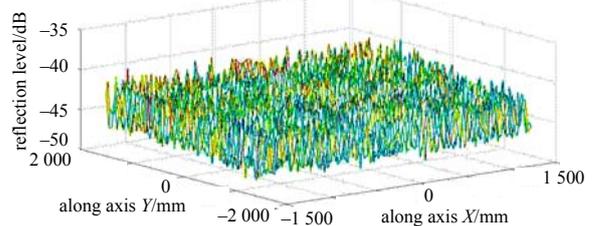


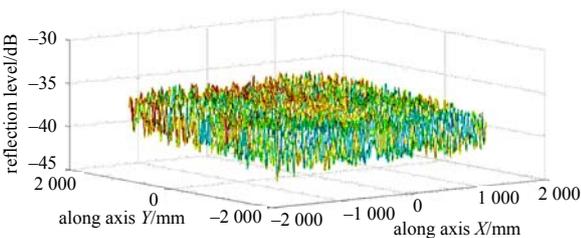
Fig.6 Diagram of an anechoic chamber  
图6 某矩形微波暗室结构示意图



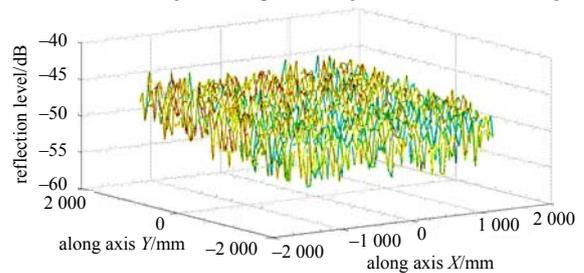
(a) reflection level on X,Y plane through heart of quiet zone when antenna at point H



(b) reflection level on X,Y plane through heart of quiet zone when antenna at point U



(c) reflection level on X,Y plane through heart of quiet zone when antenna at point D



(d) reflection level on X,Y plane through heart of quiet zone when antenna at point W

Fig.7 Part of simulation results on reflection level in the quiet zone

图7 静区反射电平仿真部分结果

### 2.3.2 仿真结果

将静区划分为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  的网格,计算静区中网格点的反射电平,发射天线位于天线阵面上典型位置时,经过静区中心主要剖面上的部分静区反射电平仿真结果见图7。

从发射天线位于不同位置的静区性能状况来看,发射天线位置越高,静区总体性能越好,发射天线位于天线阵的最高点和最低点时,静区性能相差接近  $10\text{ dB}$ ,即静区反射电平相差3倍左右。

从静区的总体性能特点来看:水平剖面上,靠近天线阵一端反射电平是整个静区里性能较好的部分,根据发射天线的不同位置,比静区其他位置的反射电平低  $1\text{ dB} \sim 5\text{ dB}$ ;远离发射天线一侧静区性能较好,比静区其他位置的反射电平低  $2\text{ dB} \sim 4\text{ dB}$ 。俯仰剖面上,靠近发射天线一侧静区性能较差,当天线位于阵面上半部分时,静区上半部分性能较差;当天线位于阵面下半部分时,静区下半部分性能较差。

## 3 结论

微波暗室的静区性能直接影响暗室的实验能力和实验结果的精确度及可信度。本文针对暗室设计过程中的关键指标,即静区性能,提出了仿真预测方法,重点进行了仿真试验原理分析、仿真建模和实验设计。经比较,某暗室的仿真结果与实际测量结果一致性较好。静区性能仿真在暗室设计过程中可以起到静区反射电平预测的作用。在暗室投入使用以后,也可以运用该方法,定期抽检吸波材料的介质参数,并结合暗室其他开口的屏蔽性能检测,如波导窗、门缝隙等的检测,实现暗室静区性能的监测。

### 参考文献:

- [1] 孙凤杰,周启明. 大型吉赫兹横电磁波室的数值分析[J]. 信息化研究, 2009,35(5):39-41. (SUN Fengjie,ZHOU Qiming. Numerical Analysis of Large-scale Giga-Hertz TEM Cell[J]. INFORMATION RESEARCH, 2009,35(5):39-41.)
- [2] 刘顺华,刘军民,董星龙,等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2007. (LIU Shunhua,LIU Junmin,DONG Xinglong,et al. Electromagnetic Wave Shield & Absorbers[M]. Beijing:Publishing House of Chemical Industry, 2007.)
- [3] 宋宇华,于名讯,朱洪立,等. 雷达波吸收性聚氨脂泡沫塑料的研究[J]. 工程塑料应用, 2006,34(12):13-16. (SONG Yuhua, YU Mingxun,ZHU Hongli,et al. Study on Polyurethane Foam Plastic with Radar Absorbing Property[J]. Engineering Plastic Application, 2006,34(12):13-16.)
- [4] 阎照文,苏东林,袁晓梅. FEK05.4 电磁场分析技术与实例详解[M]. 北京:中国水利电力出版社, 2009. (YAN Zhaowen, SHU Donglin,YUAN Xiaomei. FEK05.4 Electromagnetic Field Analysis Technology and Sample Comments[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.)
- [5] 贡华连,陈树德,乔登江. 复介电常数测量方法-同轴探针法再构建与修正[J]. 信息与电子工程, 2008,6(6):448-452. GONG Hualian,CHEN Shude,QIAO Dengjiang. Rebuilt and Modified Model for Complex Permittivity Measurement Using the Coaxing Line[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(6):448-452.)
- [6] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京:科学出版社, 2002. (WANG Bingzhong. Computational Electromagnetics[M]. Beijing:Science Press, 2002)
- [7] 洪丽娜,樊友谊,郝晓军,等. 吸波材料电参数改变对暗室静区性能的影响分析[J]. 电子测量技术, 2010,33(8):121-124.
- [8] 白保东. 电磁兼容暗室特性的时域分析研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2006. (BAI Baodong. Research on EMC Anechoic Chamber Performance in Time Domain[D]. Shenyang:Shenyang Industry University, 2006.)

### 作者简介:



洪丽娜(1975-),女,辽宁省辽阳市人,硕士,工程师,主要研究方向为射频仿真技术及其应用,email:nanahong7509@163.com.

何洪涛(1968-),男,河南省洛阳市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为电磁兼容技术.

郝晓军(1978-),男,西安市人,博士,工程师,主要研究方向为射频仿真技术及其应用.

周波(1982-),男,河南省内乡市人,硕士,工程师,主要研究方向为射频仿真技术及其应用.