

# 角反射体 RCS 微波暗室测量及分析

吕可<sup>1</sup>, 郑威<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 91336 部队, 河北 秦皇岛 066326; 2. 中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 角反射体雷达散射截面 (RCS) 的测量是雷达目标识别、成像等研究领域的一个关键环节; 在对目标 RCS 测量原理分析的基础上, 介绍了一个在微波暗室中基于紧缩场和矢量网络分析仪测量目标 RCS 的测量系统; 利用该系统对角反射体垂直姿态和 45° 姿态的 RCS 进行了 360 度转角扫频的测量, 结果与 FEKO 软件仿真计算的结果对比表明, 两种方法得到的数据走势基本一致。

**关键词:** 雷达散射截面; 紧缩场; 矢量网络分析仪; 仿真计算

## Measurement and Analysis of Corner Reflector's RCS in Microwave Anechoic Chamber

Lü Ke<sup>1</sup>, Zheng Wei<sup>2</sup>

(1. Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066326, China; 2. Unit 91404 of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** Corner reflector's radar cross section measurement is important in many fields, such as radar target recognition and radar imaging. Based on the principle of target's RCS measurement, a measurement system in microwave anechoic chamber is presented. The measurement system mainly takes advantage of the CATR and vector network analyzer. With this system, the vertical and 45° attitude of the corner reflector's RCS is measured in sweep frequency of 360 degree. Compared with the result calculated by FEKO simulation software, the trend of the data got by two methods is almost consistent.

**Keywords:** radar cross section; CATR; vector network analyzer; simulation calculation

### 0 引言

目标雷达散射截面 (RCS) 是表征目标对照射电磁波散射能力的一个物理量, 它是雷达目标特性中最基本最重要的一个参数<sup>[1]</sup>。通过对目标 RCS 的测量, 不仅可以取得对目标基本散射现象的了解, 而且可以获得大量的目标特征数据, 建立目标特性数据库, 理论上为目标电磁散射特性的研究提供理论依据, 同时为下一步进行目标识别、反隐身技术的研究、雷达等相关装备的发展打下一个良好的基础<sup>[2-4]</sup>。

当前获取目标雷达散射截面 (RCS) 的途径包括外场实测、微波暗室测量及建模仿真。外场测试基本可以满足远场条件但容易受到环境气候的影响, 获得超宽带、高分辨、高精度测量值的代价相当大。本文在微波暗室中利用紧缩场和矢量网络分析仪对装备试验中的用到的角反射体的 RCS 进行测量, 并通过仿真计算验证测量结果, 为下一步雷达目标识别、成像等领域研究试验的进行打下基础。

### 1 RCS 测量原理

RCS 是定量表征目标散射强弱的物理量, 称为目标对入射雷达波的有效截面积。一般情况下, 目标 RCS 的测量是通过测量雷达回波的功率, 按照雷达方程反算出目标的 RCS 值。若用雷达发射天线对准目标进行照射, 雷达接收功率的表达式为<sup>[6]</sup>:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

其中:  $P_t$  为雷达发射功率;  $P_r$  为雷达接收处接收回波功率;  $G_t$ ,  $G_r$  分别为雷达发射天线、接收天线的增益;  $\lambda$  为入射雷达波的波长,  $R$  为目标与雷达之间的距离;  $\sigma$  为目标的散射截面积。

由 (1) 式可以看出, 在其它参数不变的前提下, 目标散射截面积  $\sigma$  与雷达接收处的回波功率  $P_r$  成正比。若  $\sigma$  以对数形式给出, 记为  $\sigma_{dBsm}$ , 即:

$$\sigma_{dBsm} = 10 \lg \sigma \quad (2)$$

因此, 如果知道同一条件下测得的待测目标回波功率和标准球的回波功率分别是  $P_r$  和  $P_r'$ , 那么待测目标的 RCS 真实值为:

$$\sigma_{dBsm} = P_r - P_r' + \sigma'_{dBsm} \quad (3)$$

其中:  $\sigma'_{dBsm}$  是标准球的 RCS 理论值。由此可见, 通过测量待测目标和标准球的回波功率, 根据标准球的 RCS 理论值, 即可计算待测目标的 RCS 值。

### 2 测量系统的组成

微波暗室 RCS 测量分系统由紧缩场反射面、馈源、馈源支架 (含极化转台)、被测目标转台及泡沫支架、以及以 N5230A 矢量网络分析仪为核心的宽频带 RCS 测量子系统等组成。

#### 2.1 紧缩场

利用紧缩场设备, 可以在室内对较大目标进行满足远场条件下的测试。基本原理是借助于透镜或反射面, 校正来自一个点源或线源的辐射, 使在靠近透镜或反射面的被测目标或天线由一个幅度与相位都近似均匀的波前照射, 等效于在远场条件下平面波照射的效果。紧缩场系统可被视为一个球面波到平面波的“校正”器, 以满足 RCS 测量所需的远场条件。由于测

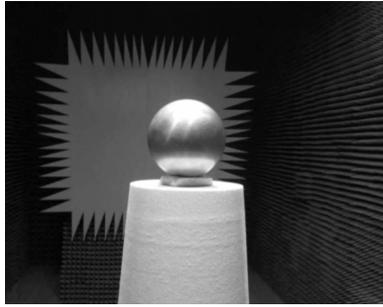
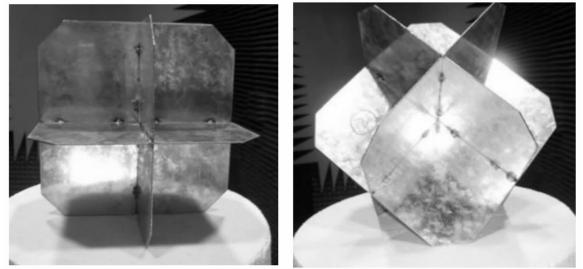


图 1 紧缩场暗室全景



(a) 垂直姿态

(b) 45° 姿态

图 3 角反射体安装示意图

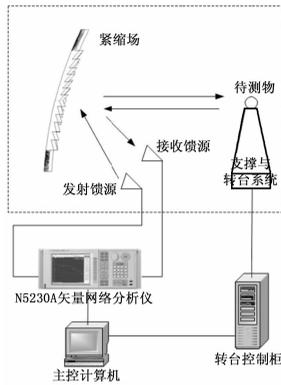


图 2 RCS 测量系统示意图 (虚线内是微波暗室)

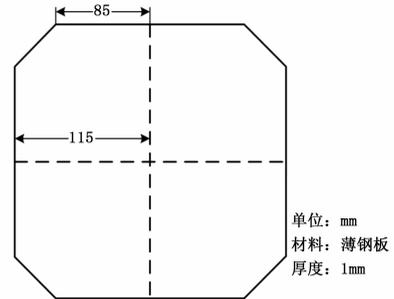


图 4 角反射体尺寸示意图

表 1 测量试验基本参数表

序号	参数项	参数值
1	测量姿态	垂直、45°
2	测量类型	定频角域 RCS 测量
3	测量极化	HH
4	测量频段	X 波段
5	测量角域范围	360°

表 2 矢量网络分析仪参数设置表

序号	参数项	参数值
1	频段	X 波段
2	中频带宽	1 KHz
3	发射功率	5 dBm
4	扫描点数	801
5	扫描方式	线性扫频
6	触发模式	单次触发
7	测量参数	S21

表 3 目标转台设置参数表

序号	参数项	参数值
1	转动度数	360°
2	转动间隔	0.5°
3	转动速度	6 转/分

表 4 测量环境参数表

序号	测量姿态	温度/°C	湿度/%
1	垂直	3	63
2	45°	4	80

试距离较短, 紧缩场系统可以安装在微波暗室中, 使测试可以不必受天气影响, 并消除了室外环境杂散电磁波可能对测试产生的干扰, 提高了测试的保密性。

本系统中用到的是一种单反射面紧缩场。

### 2.2 N5230A 矢量网络分析仪

矢量网络分析仪不仅作为信号的收发设备, 而且还作为测量设备, 测量网络的 S 参数。它既可发射宽带步进扫频脉冲信号, 也可发射单载波连续信号 (简称点频信号)。为了获得较好的收发隔离性能, 采用了准收发合置模式, 即微波信号发射和接收各用一只馈源, 所有馈源都为单线极化形式。

### 2.3 转台系统

包括支持转台系统和转台控制柜。转台安装在静区的地面上, 其上放置待测物体的泡沫支架, 使测量时受到的杂波干扰最小。

转台控制柜既可以直接本地 HMI 控制转台, 又可以与计算机连接, 进行远程计算机自动控制。

## 3 角反射体 RCS 测量过程及方法

### 3.1 角反射体

试验测试的角反射体如图 3 所示, 分别测试角反射体垂直姿态和 45 度姿态的角域 RCS 值。角反射体边长 230 mm, 倒角边长 170 mm, 金属板厚度为 1 mm。

### 3.2 测量试验设置及环境参数

测量试验设置及环境参数如表 1~4 所示。

### 3.3 测量过程及方法

根据 RCS 测量原理, 按照背景电平测量、定标测量、目标体 360 度转角测量、测量数据处理 4 个步骤进行, 提取固定频点的目标体角域 RCS 图像。具体操作步骤如下:

- 1) 不放置目标的情况下, 测量记录接收馈源处回波情况;

2) 在测量支架上放置 RCS 已知的标准球, 测量并记录接收馈源处的回波情况;

3) 用被测角反射体换下标准球, 角反射体垂直姿态放置, 以 0.5° 间隔进行 360 度转角测量, 记录每个角度接收馈源处的回波情况;

4) 把角反射体以 45° 姿态放置, 以 0.5° 间隔进行 360 度转角测量, 记录每个角度接收馈源处的回波情况。

### 4 测试结果与仿真数据对比分析

仿真试验采用 FEKO 软件建模计算。FEKO 是一个以矩量法 (MOM) 为基础的三维全波电磁场分析软件, 并集成了多层快速多极子方法 (MLFMA)、物理光学法 (PO) 和一致性几何绕射理论 (UTD) 等多种算法, 形成了一套完整的电磁计算体系<sup>[9]</sup>。对于关键性的部位使用 MM, 对其他重要的区域 (一般都是大的平面或者曲面) 使用 PO 或者 UTD, 既保证了计算的准确性, 同时兼顾了对计算机硬件配置和计算时间的要求。与其它基于有限元方法的软件相比, FEKO 不需要对吸收边界、传播空间网格等参数进行设置, 大大方便了用户的使用<sup>[10]</sup>。

#### 4.1 测量与计算结果对比

测量和仿真计算结果对比如图 5~6 所示。

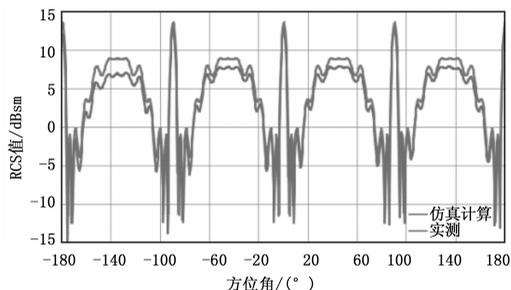


图 5 角反射体垂直姿态 RCS 数据对比

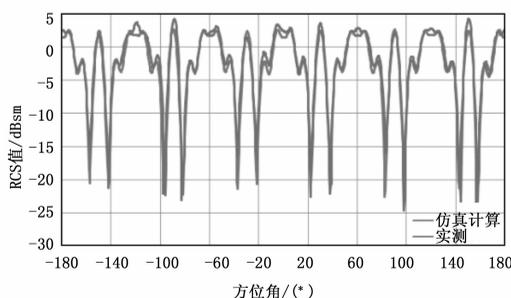


图 6 角反射体 45° 姿态 RCS 数据对比

角反射体 RCS 值统计数据如表 5 所示。

表 5 微波暗室测量与仿真计算结果统计对照表

姿态 (°)	方式	算术平均 (dBsm)	对数平均 (dBsm)	中值 (dBsm)
垂直	实际测量	3.0120	5.4293	5.2473
	仿真计算	3.9870	6.5442	6.7391
45	实际测量	-2.5986	-0.2848	-1.5480
	仿真计算	-3.1712	-0.8352	-2.1930

统计数据主要关心 RCS 结果数据的算术平均、对数平均

和中值。

算术平均值  $\bar{\sigma}$  按下式计算:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (6)$$

算术平均值的对数值  $\bar{\sigma}(dBm^2)$  按下式计算:

$$\bar{\sigma}(dBm^2) = 10 \lg \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{\sigma_i (dBm^2)}{10}} \right] \quad (7)$$

概率密度函数  $PDF(\sigma)$  是一种统计分布表示, 它代表了雷达截面为给定  $\sigma$  值出现的概率。

累积分布函数  $CDF(\sigma)$  定义为雷达截面低于或等于某个值  $\sigma$  的概率, 它由概率密度函数  $PDF(\sigma)$  曲线积分得到:

$$CDF(\sigma) = \int_{-\infty}^{\sigma} PDF(\sigma) d\sigma \quad (9)$$

中值, 即百分之五十概率值, 记作  $\sigma_{50\%}$ , 即比  $\sigma_{50\%}$  高或低的数据出现概率各占一半。此时累积分布函数按下式计算:

$$CDF(\sigma_{50\%}) = \int_{-\infty}^{\sigma_{50\%}} PDF(\sigma) d\sigma = 50\% \quad (10)$$

#### 4.2 误差及分析

图 5 和图 6 分别为角反射体垂直姿态和 45° 姿态的 RCS 数据对比。结果表明, 角反射体 RCS 值与该物体的物理形状密切相关, 在角度上呈现中心对称和轴对称的分布。微波暗室里的试验测量数据和 FEKO 软件的仿真计算数据走势基本一致, 其中垂直姿态仿真计算的数据在一些角度有规律性的偏高, 因此导致仿真计算的算术平均、对数平均和中值等统计数据都比暗室实际测量的偏高; 在 45° 姿态上, 仿真计算的统计数据比实际测量数据微微偏低。

引起误差的因素很多, 但大致分为两个方面: 一是由于 RCS 测量设备本身的误差, 主要包括定标球引入的标定误差、目标及定标球距离测量引入的误差、目标及定标球回波功率测量引入的误差、微波及中频衰减器引入的误差、雷达发射机输出功率测量及接收机增益测量引入的误差等。另外一方面是由于仿真模型与实际目标散射特性不一致带来的误差, 包括 RCS 数值计算理论方法的不完善造成的仿真误差、实测模型的焊接点及材料因素在建模时未考虑进去等。这些因素都会导致测量数据与仿真数据结果不完全一致的现象。

### 5 结论

微波暗室内 RCS 的测量研究是目前我国隐身与反隐身技术研究的有效手段。基于紧缩场和矢量网络分析仪构建的微波暗室内的 RCS 测量系统具有占地空间小、测量精度高及操作简便的特点。本文利用该系统, 对角反射体垂直姿态和 45° 姿态的 RCS 进行了 360 度转角扫频的测量, 并提取了固定频点的 RCS 数据。测量结果与 FEKO 软件仿真计算的结果对比表明, 两种方法得到的数据走势基本一致, 具有较高的准确度。对角反射体散射测量结果可以作为标定参考, 应用于下一步雷达目标识别、成像等领域研究试验中。

#### 参考文献:

[1] 张麟兮, 郭静远, 魏世京. 内场 RCS 测试环境中误差的消减方法研究 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (13): 1-3.  
 [2] 刘密歌, 赵军仓, 张麟兮, 等. 微波暗室中两种 RCS 测量系统的比较 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (3): 300-301.  
 [3] 刘兴明. 角反射体 RCS 外场简易测量方法研究 [J]. 舰船电子工

程, 2013, 33 (10): 95-97.

[4] 阮颖铮. 雷达散射截面与隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998

[5] 刘密歌, 张麟兮, 李南京. 基于矢量网络分析仪的 RCS 测量系统及应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007. 21 (1): 82-85

[6] Dybdal Robert B. Radar cross section measurement [J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75 (4): 498-519.

[7] Hu C F, Xu J D, Li N J, et al. Indoor accurate RCS measurement technique on UHF band [J]. Progress in Electromagnetics Re-

search, 2008, 81: 279-289.

[8] 潘宇虎, 李小秋, 牛宝君. 目标低频 RCS 的紧缩场测试研究 [J]. 现代雷达, 2011, 33 (12): 55-57

[9] 陈德喜, 颜 俐, 王海婴, 等. FEKO 软件的 RCS 仿真应用 [J]. 舰船电子工程, 2008, 28 (9): 125-128

[10] 罗亚松, 刘 忠, 付学志. 炮射随机角反射器阵的 RCS 预估研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (7): 2077-2080

[11] 韩红斌, 刘少强. 基于 HFSS 对目标 RCS 的仿真研究 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34 (3): 60-63.

程, 2013, 33 (10): 95-97.

(上接第 22 页)

表 4 不平衡负载时的稳态参数报表

不平衡负载	负载百分数 / %	Ua	Ub	Uc	频率	A-B 相位	B-C 相位	C-A 相位	Ua 波峰系数	Ub 波峰系数	Uc 波峰系数	Ua 总谐波畸变 / %	Ub 总谐波畸变 / %	Uc 总谐波畸变 / %	Ua 最高单次谐波含量 / %	Ub 最高单次谐波含量 / %	Uc 最高单次谐波含量 / %	电压调制量	三相电压不平衡值	Ua 畸变系数	Ub 畸变系数	Uc 畸变系数	A 相直流量	B 相直流量	C 相直流量
	25	114.39	115.06	114.32	400.17	118.24	119.25	122.49	1.41	1.41	1.41	2.19	2.09	2.42	1.51	1.36	1.57	2.43	0.72	2.69	2.5	3.17	0.07	-0.17	0.06
		合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	不合格	合格

### 3.2 瞬态参数测试结果

在功率因素等于 1 的情况下, 负载从空载突加到 80% 额定负载时的电压和频率响应见图 7。负载从 80% 额定负载突减到空载时的电压和频率响应见图 8。电压和频率瞬变在图 1 电压瞬变包络线和图 2 频率瞬变包络线范围内。

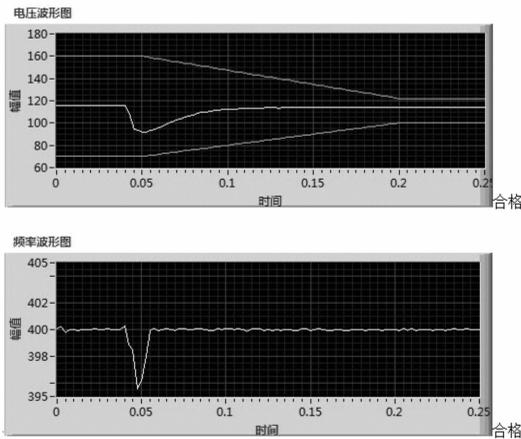


图 7 加载时的暂电压和频率响应

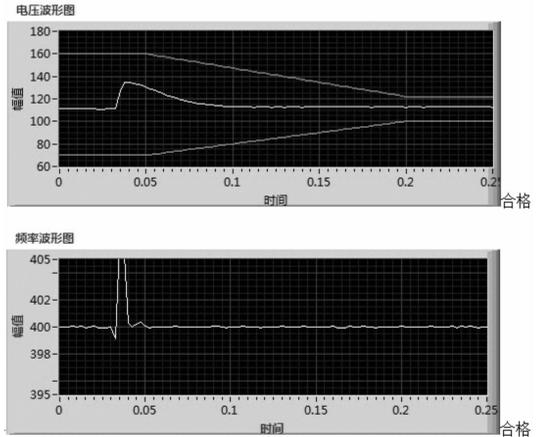


图 8 卸载时的电压和频率响应

## 4 结束语

本文设计的一种飞机机载电源特性参数测试系统, 为航空机载电源系统设计和发电机及调压器等部件维修提供了检测手段。可以根据国际和国内的标准, 对机载电源系统的稳态特性和瞬态特性参数进行测试和验证。基于虚拟基于技术研发的测试平台, 在控制和检测方面具特有的优点, 操作方便, 测量精度高, 数据图表显示清晰并便于保存。

### 参考文献:

[1] ISO1540-2006 Aerospace-Characteristics of aircraft electrical system [S]. ISO, 2006. 2;

[2] GJB181A-2003. 飞机供电特性 [S]. 总装备部军标出版社, 2003.

[3] 刘建英, 任仁良. 飞机电源系统 [M]. 北京: 中国民航出版社, 2013.

[4] 夏国清, 冯建朝, 任仁良. 基于虚拟仪器的航空逆变电源输出特性测量研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010 (11): 2555-2560.

[5] 龚仁喜, 周希松, 等. 基于 LabVIEW 的 FFT 加窗插值算法在谐波检测中的应用 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学版), 2010 (5): 64-70.

[6] 马宏忠, 宋树平, 鞠 平. 基于加窗离散傅里叶算法的谐波分析初始相位敏感性研究 [J]. 电力系统自动化, 2014 (12): 88-94.

[7] 任仁良, 王雪娇, 冯建朝. 基于 LabVIEW 飞机地面逆变电源暂态特性测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2014 (1): 19-21.