

超宽带射频仿真系统中的低 RCS 三轴转台设计

李 华 周建江 朱根才

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要:提出了在超宽带射频仿真系统中三轴转台的低 RCS 设计方法。该方法采用转台机械结构设计、低 RCS 外形优化分析与测试测量相结合的方式。首先基于低 RCS 要求及三轴转台的结构特性, 对其进行外形优化。通过计算三轴转台的表面感应电流分布, 分析三轴转台的强散射区域, 并选取相应吸波材料及涂敷方法对三轴转台进行处理。实际测量表明, 涂敷吸波材料后三轴转台散射回波幅度显著减小, 分布均匀, 达到了预设的效果。

关键词:射频仿真; 三轴转台; 雷达散射截面; 超宽带

中图分类号: TN972.44

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)06-0760-05

Radar Cross Section Reduction of Three-Axis Turntable in Ultra-wideband Radio Frequency Simulation System

Li Hua, Zhou Jianjiang, Zhu Gencai

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Low radar cross section (RCS) design method for three-axis turntable in radio frequency simulation system (RFSS) with large relative bandwidth is studied. Turntable mechanical structure design, low-RCS shape optimization analysis, and combination of test and measurement are used in the method. First, based on low RCS and the mechanical properties of three-axis turntable, its shape is optimized. Then, the surface-induced current distribution of turntable is computed and strong scattering regions are analyzed. Finally, stealth treatments as choosing absorbing materials and suitable coating methods are tested. The actual measurements show that, after coating absorbing material, the scattering echo amplitude of the three-axis turntable is significantly reduced and evenly distributed.

Key words: radio frequency simulation; three-axis turntable; radar cross section; ultra-wideband

三轴飞行转台是阵列式半实物射频仿真系统 (Radio frequency simulation system, RFSS) 中的一个关键组成部分。在半实物仿真试验中, 三轴转台的作用是将仿真机计算出的飞行姿态角的电信号转变成成为导引头和惯导系统的机械角运动。

半实物射频仿真系统的目的是检验雷达接收机对仿真目标的定位跟踪能力^[1]。因此, 射频暗室内其他部件的散射信号越小越好。由于三轴转台是全金属部件, 其散射回波对雷达接收机接收目标信号影响非常大。根据系统精度要求, 必须对转台金属体进行 RCS 减缩处理。通常的减缩处理方式是

转台安装完成后, 根据工程经验在金属体表面进行结构型吸波材料、磁损性涂料、电损性涂料的涂敷处理等^[2-4]。这种方法只适用于窄带情况, 在超宽带系统中很难满足要求。本文提出了一种转台机械结构设计、低 RCS 外形优化分析与测试测量相结合, 来降低三轴转台反射和散射回波的方法。

三轴飞行转台 RCS 减缩处理的范围必须覆盖雷达导引头的工作频段。在超宽带仿真系统中转台 RCS 减缩处理就成为了一个必须解决的问题。以 0.8~18 GHz 的频段范围为例。通常用相对带宽系数 η 来衡量一个天线或者雷达系统的宽带特性。相

对带宽系数定义如下^[5]

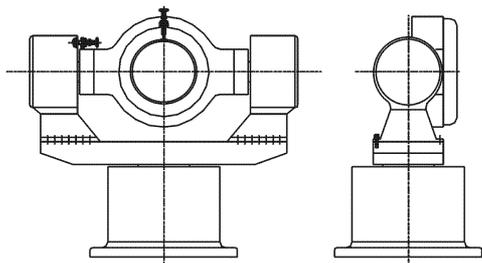
$$\eta = \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (1)$$

在 0.8~18 GHz, $f_L = 0.8$ GHz, $f_H = 18$ GHz, 所以 $\eta = (18 - 0.8) / (18 + 0.8) = 0.915$ 。此频段范围覆盖了大多数常用雷达的工作频段。如此大的相对带宽系数的转台 RCS 减缩必须从外形设计、Jau-mann 吸收体和锥形吸收体等多方面来考虑。

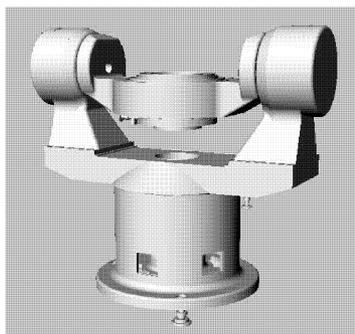
1 三轴转台低 RCS 外形优化设计

射频仿真用三轴转台低 RCS 设计有其特殊性:(1)转台本身 RCS 的减缩;(2)涂敷吸波材料对转台承重的影响;(3)涂敷吸波材料不能遮挡雷达导引头视场角,避免影响雷达导引头的正常使用;(4)转台 RCS 减缩的侧重极化方向;(5)涂敷吸波材料后不影响工作人员的操作。这就要求对转台外形进行优化设计,如图 1 所示,使得转台外表面便于涂敷吸波材料以及在满足整体性能要求下尽可能少涂敷吸波材料。在不影响转台功能的情况下,采取如下措施有利于吸波材料的涂敷:

- (1)转台外形尽量简化、规则、平整,减少小的转角,便于后期涂敷吸波材料;
- (2)将与外框连接的中框形状修改为圆台;
- (3)外框、中框零位栓尽量在导引头背向一侧;
- (4)外框、中框 U 型臂之间避免出现二面角;
- (5)减小各活动部件的间隙并进行遮挡处理;



(a) 优化前外形



(b) 优化后外形

图 1 优化设计前后的某转台外形对比图

(6)保证涂敷、吸波材料后不遮挡雷达视场角;

(7)机械用的螺栓采用沉孔设计;

(8)转台的各种接口安装在雷达导引头背向一侧,保证吸波材料涂敷后,不影响转台的转动和其他线缆的安装与调试;

(9)转台结构要充分考虑涂敷角锥形吸波材料后的各个部件会不会受到影响,以及转台负载物使用时的活动空间。

2 转台反射特性分析

目标散射主要可分为以下类型^[6]:(1)镜面反射点;(2)边缘(棱线)绕射;(3)尖端散射;(4)凹腔体等多次反射型散射;(5)行波及蠕动波散射;(6)天线型散射等。三轴转台涂敷吸波材料后,结构外形和电磁特性发生变化,表面感应电流发生改变,只需考虑镜面反射、边缘绕射和后向散射。

通过表面感应电流分析,可以获得转台各个部分的强散射区域,便于消除反射峰值。暗室墙面吸波性能在 30 dB 以上,涂敷后转台的二次和多次反射效应很小,因此只需计算水平极化下单站单次反射的表面电流。

高频电磁计算方法物理光学法完全忽略了各部分感应电流之间的相互影响,仅根据入射场独立地近似确定表面感应电流,适于求解目标的一次散射中心区域。选取 H 型 PO 公式: $\mathbf{J}_s = 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^i$; $\mathbf{M}_s = 0$; 由 Stratton-Chu 方程可得远区($r \rightarrow \infty$)的散射场

$$\mathbf{E}^s = \frac{j\mathbf{k}}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_S \hat{\mathbf{s}} \times (\mathbf{M}_s + \eta_0 \hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{J}_s) \exp[j\mathbf{k}r' \cdot (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{i}})] ds' \quad (2)$$

$$\mathbf{H}^s = -\frac{j\mathbf{k}}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_S \hat{\mathbf{s}} \times (\mathbf{J}_s - \frac{1}{\eta_0} \hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{M}_s) \exp[j\mathbf{k}r' \cdot (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{i}})] ds' \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{i}}$ 为入射方向单位矢量; $\hat{\mathbf{s}}$ 为入射方向单位矢量; S 为目标表面的照明部分; \mathbf{J}_s 和 \mathbf{M}_s 分别为表面电流和表面磁流。

通过式(2,3)可以求出转台表面的电磁流分布。由于反射特性在 0.8~18 GHz 整个频段范围内都处于光学区,表面感应电流渐变变化,可选取几个特定的频率点进行分析,再扩展到其他频率上。

图 2 列举了转台转动($\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$)时水平极化下不同频率的表面电流分布的部分计算结果。图 3 列举了水平极化下在 $f = 0.8$ GHz 时不同姿态角的表面电流分布的部分计算结果。图 4 列举了转台转动($\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$)时垂直极化下不同频率的表面电流分布的部分计算结果。图 5 列举了垂直极化下在 $f = 0.8$ GHz 时不同姿态角的表面电流分布的部分计算结果。

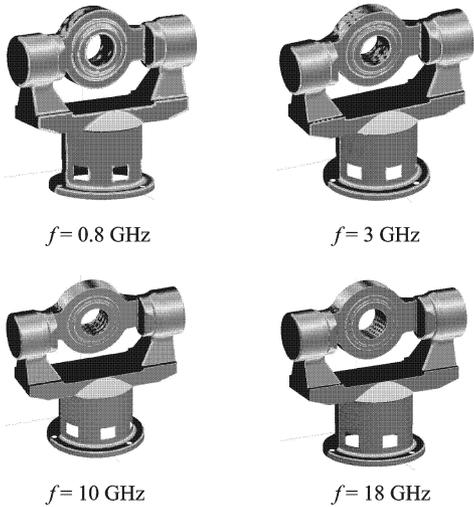


图2 水平极化下($\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$)时不同频率下的表面感应电流分布图

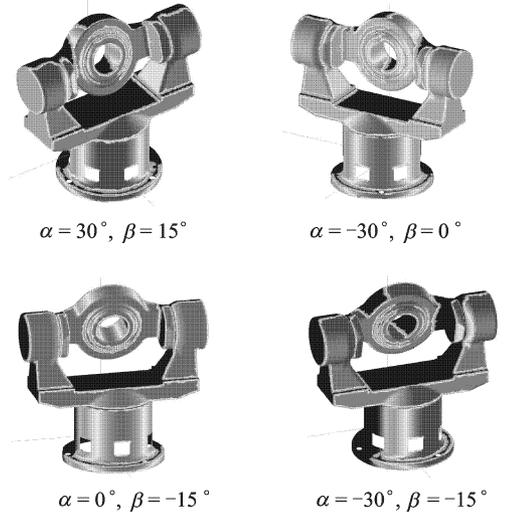


图5 垂直极化下($f=0.8 \text{ GHz}$)时不同姿态角的表面感应电流分布图

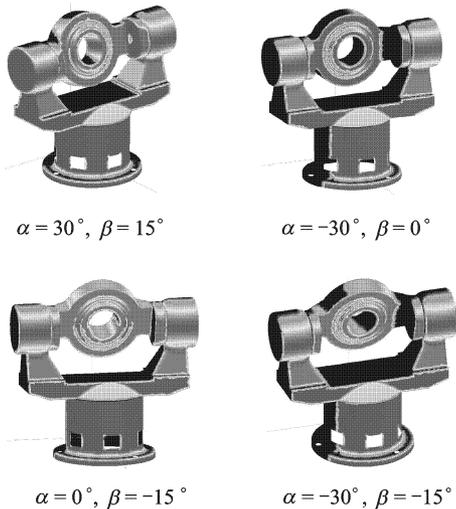


图3 水平极化下($f=0.8 \text{ GHz}$)不同姿态角的表面感应电流分布图



图4 垂直极化下($\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$)不同频率下的表面感应电流分布图

通过上述在不同频率、不同姿态角度、不同视角角度和不同极化方式下表面感应电流的仿真计算可知,转台底座、外框横梁、外框支架、中框前侧、中框上部、中框内侧面、内框前表面都是比较强的强散射区域,是吸波材料涂敷的重点区域。

3 转台吸波材料涂敷

3.1 吸波材料选择

由式(1)可知, $\eta=0.915$,接近1,单一的 Jaumann 吸收体和锥形吸收体是无法满足性能要求的^[7]。本文采用了角锥形、圆锥形、波浪突形和平板形吸波材料,材料高度有30,50,100,200,400和500 mm 等不同型号,包括泡沫吸波材料和铁磁性、铁氧体橡胶磁性吸波材料。铁磁性、铁氧体橡胶磁性吸波材料能够达到4倍高度的泡沫材料的性能,特别适用于复杂结构的低RCS处理^[8]。

3.2 吸波处理实施

三轴转台有3个转动部件,涂敷材料后不能遮挡雷达导引头视场角,所涂敷的吸波材料高度受到限制。因此尽量选择多种吸波材料,在不影响转动的情况下,适当选择较高的吸波材料。在一些特殊部位也采用橡胶磁性材料与泡沫材料相结合;部分部件做到“刺猬状”,并适当用一些铁氧体材料。在涂敷吸波材料时侧重消除水平极化方向的雷达反射信号。

(1)吸波处理实施原则:①不允许转台金属体表面有裸露部分在电磁场入射方向上;②根据转台金属体表面形状分别进行平滑处理;③吸波处理后不影响转台的相对运动。

(2)吸波材料涂敷的方法:①圆锥和角锥吸波材料涂敷时必须与入射场的方向指向一致,以增大材料的吸波效率。②块与块之间无缝隙。③角反射外形处理。对于固定的角反射型应用泡沫吸波实体填充平滑过渡。对于一端活动,另一端不动的角反射面,利用吸波材料覆盖留有间隙的平滑过渡处理。④对于凹凸不平的地方用整体覆盖吸波材料的方法进行处理。

在超宽带吸波材料涂敷时,由于微波暗室内各个部分之间的相互影响,吸波材料的涂敷是一个反复调整的过程。另外,入射波的反向散射率随入射角的增大,金属板和材料两种情况相差减小;随金属板尺寸与波长相比越小,两种情况相差越小。

4 RCS 减缩效果的测试测量

根据射频仿真系统 RCS 缩减的特点,本文设计了一种用于测量吸波材料的反射系数的测试系统。系统由以下部分组成:矢量信号源、功率放大器、调制器、调制脉冲产生器、环形器、天线、接收机及示波器等。利用脉冲产生器产生的窄脉冲信号,对信号源输出的射频信号进行调制,产生键控调制信号,该信号经放大器放大后由天线发射;接收到的回波信号输入接收机与本振信号进行混频,经中频输出后由示波器直接测量。

测试频段抽取0.8~18 GHz 中的部分频点,转台俯仰角: $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$,方位角: $-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。

测试原理:涂敷吸波材料之前,选择一定的俯仰角、方位角(相隔大致 5°)和频点,利用本系统测量的回波功率记为 P_f ;涂敷吸波材料后,在相同条件下测量的回波功率记为 P_b ,则吸波材料的反射系数可用下式求出

$$\eta_r = 10 \lg \frac{P_b}{P_f}$$

方案1 单站测试

采用单站,即利用一只环形器一个收发天线来达到收发信号的目的。此方法可以直接利用仿真系统的阵列天线作为收发天线。测试系统流程图如图6所示。

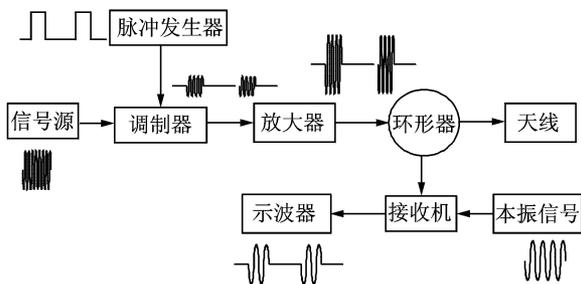


图6 单站测试系统流程图

信号发射:利用信号源和脉冲发生器分别产生一射频信号和脉冲信号,将射频信号和脉冲信号通过调制器产生一个键控调制信号。放大器的作用是将调制信号放大,然后通过环形器送至天线进行发射,这就完成了信号的发射。

信号接收:利用环形器将天线接收到的信号送到接收机,然后通过与本振信号混频,产生一中频信号,此测试方案不使用检波器,而直接用示波器看混频后的中频信号。

方案2 双站测试

双站测试,即分别使用收发天线进行测试,测试系统流程图如图7所示。

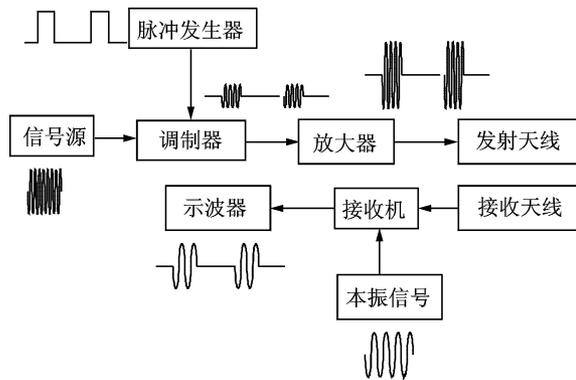


图7 双站测试系统流程图

信号发射:与单站测试基本相同,只是调制信号经过放大器放大后,不经过环形器而直接送至发射天线进行发射。

信号接收:单独使用接收天线,将接收到的信号送至接收机,后面处理与单站测试时相同。

由于仿真暗室的结构特殊,转台安装平台区域小,在暗室内架设发射和接收天线较困难,且会影响静区性能。直达波暗室墙面吸波性能在30 dB以上,经暗室反射后,影响较小,对射频仿真系统的测试测量工作影响不大,本文未实施双站测量。

5 转台 RCS 减缩效果测量结果

在涂敷吸波材料前、后,三轴转台在水平极化和垂直极化下散射回波的单站测量结果见表1,2。

表1 水平极化下三轴转台 RCS 减缩效果测量结果

频率/ GHz	转台姿态角		贴覆前回	贴覆后回	减缩效 果/dB
	$\theta/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$	波幅度 /dB·m	波幅度 /dB·m	
0.8	0	0	41.58	23.22	-18.36
	0	+15	40.51	23.10	-17.41
	0	-15	38.73	25.62	-13.11
	-30	0	26.14	24.42	-1.72
	-30	+15	27.95	25.56	-2.39
	-30	-15	25.27	25.62	0.35

续表

频率/ GHz	转台姿态角		贴覆前回 波幅度 /dB·m	贴覆后回 波幅度 /dB·m	减缩效 果/dB
	$\theta/(\circ)$	$\phi/(\circ)$			
0.8	+30	0	27.81	24.81	-3.01
	+30	+15	25.15	25.42	0.27
	+30	-15	26.07	26.00	-0.07
3	0	0	43.51	20.21	-23.30
	0	+15	43.11	28.02	-15.09
	0	-15	43.11	29.01	-14.11
	-30	0	42.72	29.79	-12.93
	-30	+15	40.48	30.10	-10.38
	-30	-15	38.73	30.06	-8.67
	+30	0	37.40	29.94	-7.46
	+30	+15	39.33	29.99	-9.34
	+30	-15	37.68	30.37	-7.30
18	0	0	42.21	7.62	-34.59
	0	+15	37.32	6.78	-30.55
	0	-15	36.51	3.62	-32.89
	-30	0	37.37	12.08	-25.29
	-30	+15	19.19	7.27	-11.92
	-30	-15	13.17	7.03	-6.21
	+30	0	37.56	2.46	-35.10
	+30	+15	16.97	4.81	-12.16
	+30	-15	19.83	7.62	-12.21

表2 垂直极化下三轴转台 RCS 减缩效果测量结果

频率/ GHz	转台姿态角		贴覆前回 波幅度 /dB·m	贴覆后回 波幅度 /dB·m	减缩效 果/dB
	$\theta/(\circ)$	$\phi/(\circ)$			
0.8	0	0	41.01	31.51	-9.50
	0	+15	36.28	33.42	-2.85
	0	-15	34.39	34.06	-0.33
	-30	0	32.49	32.45	-0.04
	-30	+15	32.73	32.64	-0.09
	-30	-15	33.87	32.03	-1.01
	+30	0	31.78	32.56	0.78
	+30	+15	33.00	32.89	-0.11
	+30	-15	34.11	33.52	-0.60
3	0	0	42.67	19.37	-23.30
	0	+15	41.68	26.26	-15.42
	0	-15	42.28	26.18	-16.10
	-30	0	40.21	35.17	-5.04
	-30	+15	41.60	35.36	-6.22
	-30	-15	40.99	35.03	-5.96
	+30	0	42.86	34.32	-8.54
	+30	+15	41.76	35.00	-6.76
	+30	-15	39.14	35.19	-3.95
18	0	0	42.13	-9.17	-51.30
	0	+15	33.88	-16.02	-49.91
	0	-15	35.13	-10.92	-46.05
	-30	0	36.27	-6.48	-42.75
	-30	+15	12.98	-7.72	-20.71
	-30	-15	6.39	-10.00	-16.39
	+30	0	37.84	-11.94	-49.78
	+30	+15	19.99	-11.94	-31.93
	+30	-15	20.40	-6.48	-26.87

6 结束语

从测量结果来看,在工作频段0.8~18 GHz 范围内,三轴转台达到了很好的RCS 减缩效果。经过处理后水平极化方向上的散射回波比远最大散射回波下降约20~30 dB,均比原最小散射回波小,满足射频仿真的需要。由于本文中侧重水平极化方向的RCS 减缩,所以垂直方向的效果相对较差。同时也看到,在某些角度下,三轴转台本身的散射回波幅度已经很小了,接近暗室背景值,无法精确测量出涂敷吸波材料的减缩效果。在0.8 GHz 时,转台的部分尺寸与发射信号的波长近似,除非增大转台尺寸,或者涂敷吸收性吸波材料,仅仅通过角锥吸波材料是无法降低雷达回波的。

参考文献:

- [1] David B. Modernization of a complex hardware-in-the-loop simulator[R]. AIAA:2002-5039,2002.
- [2] William F B. The beginnings of stealth technology [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,1993,29(4):1377-1385.
- [3] Wang P, Zhou L Z, Tan Y H, et al, Analysis of impacts of various RAM on RCS of 3-D complex targets using the FEM-FMA [C]//2004 3rd International Conference on Computational Electromagnetic and Its Applications. [S.l.]:IEEE, 2004:130-133.
- [4] Hemming L. Electromagnetic anechoic chambers: a fundamental design and specification guide [M]. A John Wiley & Sons Inc. Publication: IEEE Press, 2002:27-48.
- [5] Harmuth H F. On the effect of absorbing materials on electromagnetic waves with large relative bandwidth [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1983,(EMC-25)(1):32-39.
- [6] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [7] Farmer S J, Laight A J K, Grant I D, et al. Structural radar absorbent materials [J]. IEEE, Defence Research Agency, Holton Heath, 1990;2(1/4):68-73.
- [8] 安皓. 暗室吸波材料的进展与场地电压驻波比验证方法 [J]. 安全与电磁兼容, 2008(04):45-48.