

某卫星固面反射器热变形测试分析与模型修正

万小平, 于新战

(中国空间技术研究院 西安分院, 西安 710100)

摘要: 为评估反射器在轨热变形对天线射频性能的影响, 文章详细介绍了某卫星固面反射器的热变形测试过程, 分析了测试结果及有关数据处理方法。通过热变形测试验证了测试产品设计与工艺的合理性, 并基于测试结果修正了分析模型, 有助于提高反射器在轨热变形分析精度。

关键词: 反射器; 热变形测试; 摄影测量; 分析模型

中图分类号: V414.3

文献标志码: B

文章编号: 1673-1379(2016)06-0672-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2016.06.018

Test and analysis of thermal distortion of a deployable CFRP reflector

WAN Xiaoping, YU Xinzhan

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

Abstract: This paper presents in detail the structure of the reflector, the thermal distortion test system and the measuring procedure, and analyzes the measurement results and the data processing methods. The measurement results validate the mechanical design and the manufacturing process of the product, and provide a basis to correct the thermal distortion analysis model for a precise analysis of the thermal distortion of the reflectors.

Key words: reflector; thermal distortion test; photogrammetry; analysis model

0 引言

随着航天技术的发展, 多功能卫星系统日益增多, 载荷系统中的天线数量也越来越多。为满足卫星与火箭的结构相容性, 卫星天线多采用可展开结构形式。其中, 一维固面可展开天线应用较为广泛。天线在轨工作阶段, 在空间热载荷作用下, 反射器的型面会产生相应的变形即热变形, 而热变形是影响天线射频性能的重要因素之一, 尤其对于热变形较为敏感的天线更是如此。为准确评价反射器在轨热变形对天线射频性能的影响, 需要对反射器进行热变形测试, 并基于测试结果修正热变形分析模型, 以提高反射器在轨热变形分析的准确度, 进而采取措施降低天线在轨射频性能因热变形而发生恶化的风险。

在中国空间技术研究院承担研制的“鑫诺五号”通信卫星项目中, 采用2副一维可展开固面天

线, 并对其中一副口径为 $3\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ 的一维可展开固面反射器采用摄影测量方法进行了热变形测试。测试在法国图卢兹 INTERSPACE 公司的真空设备中进行, 分别测试了常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高温($100\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低温($-150\text{ }^{\circ}\text{C}$)工况下反射器的型面精度, 分析了高、低温工况相对于常温工况的热变形误差, 并与热变形的分析预示结果进行了比对研究, 修正了仿真分析模型。本文将详细介绍这次热变形测试的测试设备、测试过程、测试结果比对分析情况, 以及仿真分析模型修正结果。

1 热变形测试情况

固面反射器热变形测试系统具体包括真空高低温设备、摄影测量设备及固面反射器3部分, 三者之间的分布如图1所示, 支撑结构形式如图2所示。其中摄影测量设备为VSTAR系统, 采用一台

固定相机。固面可展开反射器与摄影测量基准放置于支撑结构上; 试验过程中为确保反射器温度的均匀性及型面的测量精度, 转动机构带动反射器一起缓慢转动^[1]。为消除试验过程中支撑结构对反射器热变形的耦合影响, 支撑结构通过 3 个支撑点将反射器进行简支^[2]。

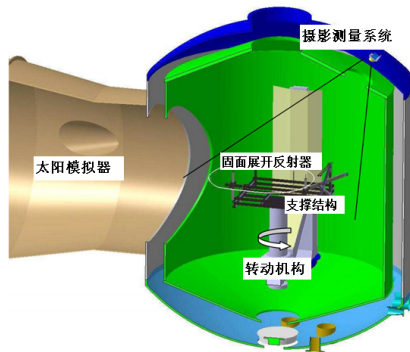


图 1 热变形测试系统
Fig. 1 The thermal distortion test system

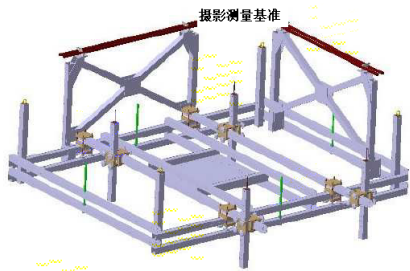


图 2 支撑结构
Fig. 2 The support structure

反射器为固面可展开结构形式 (见图 3), 采用碳纤维-铝蜂窝夹层结构, 具体包括赋形反射面、展开臂及背部加强筋。

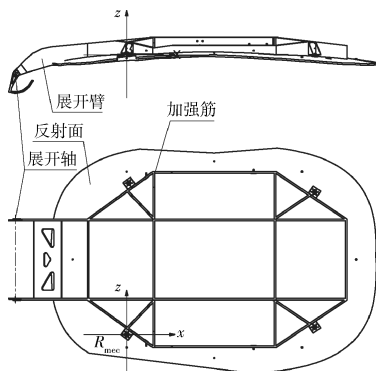


图 3 固面反射器结构示意图
Fig. 3 The structure of the CFRP reflector

为准确获取反射器各部位的温度, 试验中在反射面、展开臂、测量基准等部件上共粘贴了 29 个温度传感器^[1], 具体分布如图 4 所示。

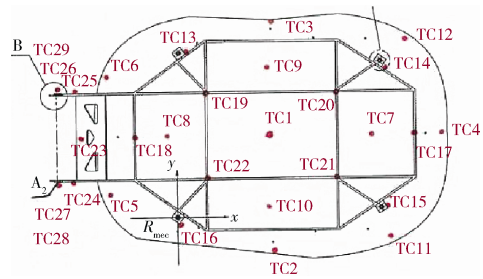


图 4 反射器温度传感器分布
Fig. 4 The thermocouples on the reflector

试验过程中反射器安装于高低温真空试验设备的状态见图 5, 为获取反射器型面相对于展开臂展开轴的转角误差, 在展开轴处安装了测试基准 (见图 6)。

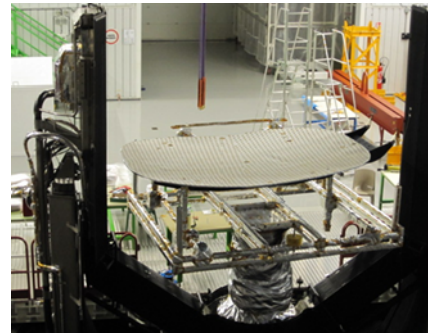


图 5 反射器安装于高低温真空试验设备中
Fig. 5 The reflector mounted in the test system

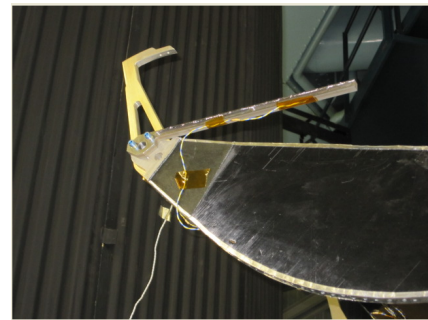


图 6 展开轴测试基准
Fig. 6 Test base of the deployment axis

根据天线的在轨热分析结果确定了高温 (100 °C) 与低温 (-150 °C) 2 个极限工况进行测试, 试验过程的温度控制曲线如图 7 所示。

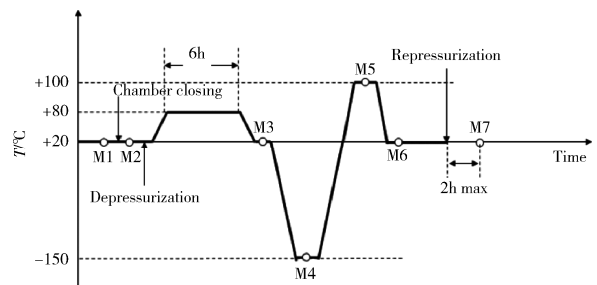


图 7 试验过程温度控制曲线
Fig. 7 The temperature control curve in the test

图 7 中的 M1~M7 为型面精度测试时点: M1 为反射器安装于支撑结构后; M2 为高低温真空设备关闭后; M3 为抽真空并高温 80 °C 除湿后; M4 与 M5 分别为低温与高温工况; M6 为试验后温度恢复至常温; M7 为恢复常压后。因此,湿度对反射器型面精度的影响为 M3 时刻与 M2 时刻的型面测量值间的差值 (M3-M2); 而低温工况下的型面热变形为 M4-M3; 高温工况下的型面热变形为 M5-M3。

2 热变形测试结果

试验中按照图 7 所示的温度控制曲线,完成了所有的工况测试,温度误差满足要求,测试数据有效,其中低温工况热变形测试阶段的典型测温点温度曲线如图 8 所示。各工况型面精度与转角偏差结果分别如表 1 与表 2 所示。图 9 和图 10 分别为高温工况的热变形型面偏差分布和热变形指向偏差分布^[3]。

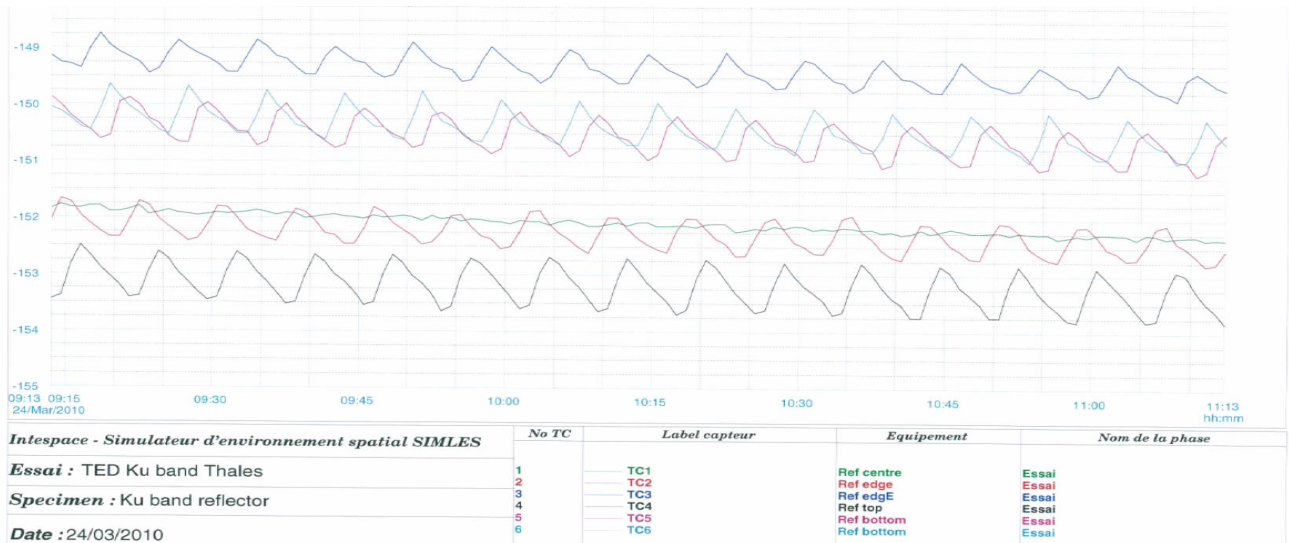


图 8 低温工况热变形测试阶段典型测温点温度曲线
Fig. 8 The typical temperature cycle curves in LT case

表 1 各工况热变形型面偏差测试结果
Table 1 The surface error of the thermal distortion test results in different cases

测试项目	型面偏差/ μm			
	δx	δy	δz	Total
M2-M1	14	11	21	27
M3-M2	94	63	44	122
M4-M3	459	233	251	573
M5-M3	190	78	190	280
M6-M3	13	5	34	37
M7-M2	103	67	50	132
M7-M3	10	6	21	24

注: 每个方向的变形为对应测试工况的相应点坐标偏差的 RMS, 如 M4-M3 的 x 向变形计算公式为

$$\delta x_{(M4-M3)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{M4i} - x_{M3i})^2}{n}}$$

而总变形为

$$\text{Total} = \sqrt{\frac{\delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2}{3}}$$

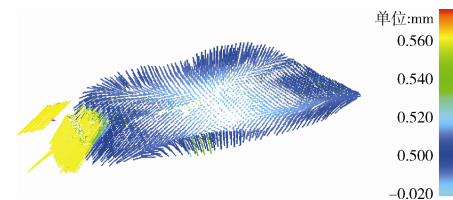


图 9 高温工况的热变形型面偏差分布
Fig. 9 The thermal distortion surface error distribution in HT case

表 2 各工况热变形指向偏差测试结果
Table 2 The pointing errors of the thermal distortion test result in different cases

测试项目	指向偏差/(°)		
	δR_x	δR_y	δR_z
M2-M1	-0.001 1	0.000 1	-0.000 5
M3-M2	-0.009 7	-0.006 0	-0.002 7
M4-M3	0.008 3	0.028 1	-0.003 7
M5-M3	-0.022 9	-0.039 6	-0.005 2
M6-M3	-0.011 5	0.013 9	-0.005 1
M7-M2	-0.020 0	0.002 3	-0.008 0
M7-M3	-0.010 3	0.008 8	-0.005 2

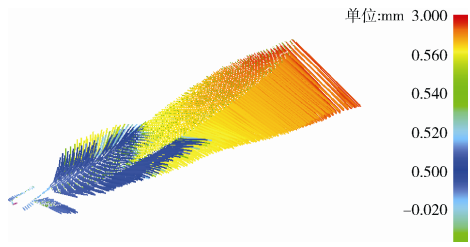


图 10 高温工况的热变形指向偏差分布
Fig. 10 The pointing error distribution in HT case

从表 1 和表 2 所示测试结果可以得到如下结论:

1) 型面精度摄影测量误差小于 $30\ \mu\text{m}$, 与总热变形 $573\ \mu\text{m}$ 相比, 测量误差仅为 5.2%, 满足小于 10% 的误差要求;

2) 湿度造成的反射器变形型面偏差为 $122\ \mu\text{m}$, 约为极限低温工况下热变形型面偏差的 21%;

3) 极限低温工况下反射器的热变形型面偏差为 $573\ \mu\text{m}$, 指向偏差最大为 0.0281° ;

4) 极限高温工况下反射器的热变形型面偏差为 $280\ \mu\text{m}$, 指向偏差最大为 0.0396° ;

5) M6-M3 结果显示热真空循环前后反射器型面精度稳定。

根据上述测试结果, 对反射器热变形仿真分析模型进行了修正, 修正后的高温与低温工况下的热变形分析结果如表 3 所示。

表 3 反射器热变形仿真分析结果

Table 3 Analysis result of the thermal distortion surface error

	型面偏差/ μm			
	δx	δy	δz	Total
低温工况	335	159	313	485
高温工况	184	125	164	276
	指向偏差/ $^\circ$			
	δR_x	δR_y	δR_z	
低温工况	0.008 3	0.028 1	-0.003 7	
高温工况	-0.022 9	-0.039 6	-0.005 2	

图 11 和图 12 分别为低温和高温工况下热变形分布的分析结果。

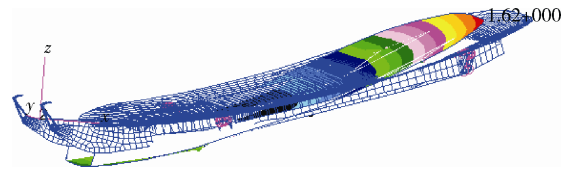


图 11 低温工况热变形分析结果
Fig. 11 The thermal distortion analysis result in LT case

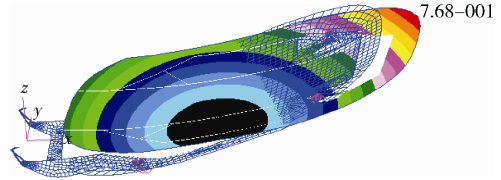


图 12 高温工况热变形分析结果
Fig. 12 The thermal distortion analysis result in HT case

热变形分析与测试结果的比对如表 4 所示。结果表明, 基于反射器热变形测试结果修正热变形仿真分析模型后, 热变形型面精度分析与测试结果间在总变形上的差值为 $88\ \mu\text{m}$, 满足小于 $150\ \mu\text{m}$ 的要求, 仿真模型准确、可用。

表 4 反射器热变形测试与仿真分析结果比对

Table 4 The comparison between test and analysis

	测试与仿真分析结果间的差值/ μm			
	x 向	y 向	z 向	总变形
低温工况	124	74	62	88
高温工况	6	47	26	4

3 结束语

本文通过极限高低温工况的热变形型面精度测试, 获取了反射器在高低温下的热变形, 验证了现有反射器的设计与加工工艺的合理性。同时修正了反射器热变形仿真分析模型, 提升了此类反射器的产品成熟度, 为更准确预示反射器在轨热变形奠定了基础, 进而有助于降低反射器在轨热频率性能恶化的风险。

参考文献 (References)

[1] MAMOU M. Special TED test procedure for Ku band reflector. Interspace: IP-10-S5-004[R], 2010

[2] STEGMAN M D. Solar thermal vacuum testing of deployable mesh reflector for model correlation[R]. JPL, 2010-03

[3] DAVID J F. SINOSAT-5 Ku domestic TED report: TAS-10-SINO-161[R]. TAS, 2010

(编辑: 张艳艳)