

# 某卫星大型天线真空低温展开试验

从强, 徐燕菱

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 文章采用试验件主动控温的方法, 完成了某卫星大型天线常压低温展开试验, 对天线进行了展开控制和结构应变及展开阻力矩的测试, 试验结果验证了天线在空间复杂温度环境中成功解锁、展开和锁定的能力, 为大型空间展开机构的地面试验积累了经验。

**关键词:** 天线; 可展开机构; 真空; 低温

**中图分类号:** V416.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2010)02-0157-03

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.02.006

## 1 前言

某卫星天线其尺寸较大且结构复杂, 根据卫星构型要求需要在发射阶段保持收拢状态, 到达空间预定轨道后按地面指令进行展开和锁定。而空间的真空、高低温环境十分恶劣, 对展开机构的正常展开、锁定有较大的影响。

卫星在轨飞行时, 由于星体和太阳能电池阵的遮挡, 使得部分天线处于阴影中, 而部分天线被阳光照射, 这样在天线的各部分间就形成了温度差, 从而引起结构的变形, 对天线的展开也有很大的影响。因此需要在地面尽量真实地模拟卫星在轨的实际温度环境, 以检验天线可靠解锁、展开、锁定的能力。

地面热真空试验的对象一般为卫星系统、电子单机、结构等状态固定的产品, 对于天线、太阳能电池阵等大型空间可展开部件, 由于试验难度和成本等原因, 一般只针对活动部件来进行试验, 而较少针对完整的展开部件来进行热真空环境下的展开试验。

随着空间可展开部件复杂程度的增加, 如桁架式展开天线, 单一部件的热真空试验已经不能完全说明系统的展开可靠性, 有必要对其进行完整的可展开部件在热真空环境下的展开试验。

## 2 试验对象和试验要求

### 2.1 试验对象与试验原理

天线试验件主要包括天线内板、天线外板、模拟中板和安装模拟墙, 如图1所示。安装模拟墙与

立式真空罐底板连接, 展开前, 天线内板和天线外板通过压紧释放装置收拢压紧在安装模拟墙上。天线展开时, 压紧释放装置解锁, 驱动电机启动, 使内板相对于安装模拟墙转动, 天线外板相对于天线内板转动。

为消除地面重力对天线展开的影响, 天线内、外板通过吊索连接并固定在真空罐体内直线导轨的滑车上, 两根吊索的张力分别与天线内、外板的重量相等, 并通过其质心。

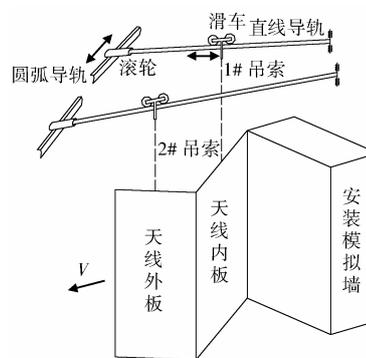


图1 天线地面展开试验原理图  
Fig. 1 Principle of ground antenna deployment test

### 2.2 试验要求

天线在轨展开时, 上部被太阳能电池阵遮挡, 处于低温状态。通过计算, 明确了试验温度的分布要求, 选取天线上的关键部位进行了较为严格的温度控制。在低温下进行天线展开控制试验的同时需要进行天线结构的应变测试, 通过应变值可以分析天线结构随温度变化的变形和受力情况。

收稿日期: 2008-10-21; 修回日期: 2009-12-24

基金项目: 国家重大科技专项工程

作者简介: 从强(1973-), 男, 高级工程师, 从事空间机构的研究工作。联系电话: (010) 68744290。

在天线展开过程中进行展开阻力矩测试,以获取低温下机构的驱动力矩裕度。

### 3 真空低温试验方案

试验方案主要包括真空低温环境模拟、天线温度控制、零重力模拟、天线展开控制及性能测试等部分<sup>[1]</sup>。

#### 3.1 真空低温环境

试验在立式真空罐中进行,主要有6项技术要求。

- (1) 工作压力: 优于  $6.67 \times 10^{-4}$  Pa;
- (2) 热沉温度:  $\leq -185$  °C;
- (3) 内壁表面吸收系数:  $\geq 0.85$ ;
- (4) 真空系统: 无油真空系统;
- (5) 罐体的有效空间: 直径 5.1 m, 高 11 m;
- (6) 罐内安装摄像机和照明设备, 用于监视和记录天线展开的过程。

#### 3.2 试验对象的温度控制

由于需要模拟天线上的温度分布,必须对天线进行温度控制且要求在  $\pm 5$  °C 偏差范围内。

在天线的内板和外板上,分区域粘贴了电加热器,部分机构部件上也粘贴了电加热器,通过控制电加热器的开闭和功率大小调节试验对象对应部位的温度值。

对于难以实施电加热器粘贴的部件(如展开铰链),采用了红外灯加热的方法,通过红外灯的功率调节进行控温。

#### 3.3 零重力模拟

如图 1 所示,零重力模拟装置主要由直线导轨、圆弧导轨、滑车、滚轮、吊索等组成。直线导轨可以绕其一端的转轴转动,另一端的滚轮在圆弧导轨上滚动;滑车可以在直线导轨上滑动;吊索中包含有弹簧,其施加的张力与被平衡的天线部分重量相等。要求在天线展开过程中,吊索张力与被平衡天线部分重量的比值在 0.95~1.05 之间。

在天线展开过程中,滑车和直线导轨跟随天线运动。在转轴部位和导轨结构上安装有加热器,以保证在真空低温环境下零重力模拟装置能够正常工作。通过对试验吊索中弹簧刚度的选配设计,可以使由于低温引起的吊索张力的变化仍控制在许可的范围内。

在吊索中还串连有电子测力计,用于在天线展

开过程中对吊索中的张力进行监视。

### 3.4 天线展开控制及性能测试

#### 3.4.1 天线展开控制

天线展开控制主要包括压紧释放装置解锁控制和展开过程控制。

压紧释放装置是由火工组件驱动的机械装置,由火工品电源进行控制。试验时火工品电源给火工组件供电,压紧释放装置解锁,天线开始展开。

使用计算机和天线展开程序控制器控制天线的展开,并实时监测天线展开过程中的遥测数据,如转动角度、到位开关信号。在天线展开过程中,计算机每隔 0.5 s 对遥测数据进行一次记录。

#### 3.4.2 结构应变及展开阻力矩的测试

(1) 部件的应变测试主要包括天线结构的应变和展开机构部件的应变;

(2) 应变测试采用常用的电阻应变测量方法,测试过程中悬挂校准样以说明测试系统的正确性;

(3) 展开阻力矩的测试采用在传动部件中串接的扭矩传感器;

(4) 每只扭矩传感器对应使用一台测试仪,对测试结果进行显示和记录。

## 4 试验过程和结果

### 4.1 试验过程

(1) 检查和确认各系统状态,包括真空系统状态、测控温系统状态、应变测试系统状态、天线零重力模拟系统状态、试验件状态等;

(2) 关闭真空罐;

(3) 抽真空,启动低温系统降温;

(4) 开始应变测试,启动测控温系统;

(5) 当各温度控制点的温度遥测值满足要求后,准备进行天线低温展开试验;

(6) 火工品起爆,压紧释放装置解锁,天线展开;展开过程中进行摄像,监视天线展开情况,监测展开机构遥测数据,测量应变值,记录温度值;天线展开到位,电机停止工作,展开试验结束;

(7) 回温,复压;

(8) 开罐。

### 4.2 试验结果

#### 4.2.1 试验真空度和温度结果

试验过程中,真空罐内的压力优于  $2 \times 10^{-4}$  Pa,

满足试验要求。

真空罐热沉的温度在 $-140\sim-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间波动, 天线展开试验时, 稳定在 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 如图2所示。

天线展开时刻, 天线上控温点的温度值与目标值的符合很好, 均在要求的 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 偏差范围内, 成功实现对天线不同部位的温度控制。

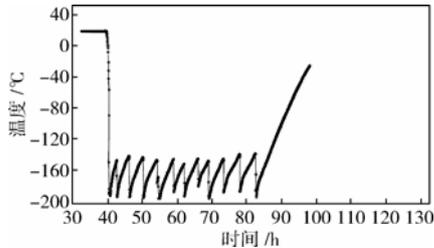


图2 真空罐温度曲线

Fig. 2 The vacuum can temperature

#### 4.2.2 天线展开结果

当各控温点温度满足试验要求后, 开始进行天线展开试验, 监视结果表明天线解锁、展开及锁定正常。

试验后检查天线各零部件完好, 展开性能正常, 说明天线能够在真空低温环境下可靠解锁、展开和锁定, 真空低温环境未对天线的展开性能造成不可恢复的影响。

#### 4.2.3 展开过程中吊索张力的测试结果

在天线展开过程中, 吊索上的张力会发生波动, 同时温度的变化也会引起吊索张力的变化。

在常温常温条件下, 1#吊索中的张力与被平衡的天线部分重量的均方差为 $4.9\text{ N}$ , 2#吊索中的张力与被平衡天线部分重量的均方差为 $10.79\text{ N}$ 。

真空低温条件下的吊索张力如图3所示, 1#吊索中的张力与被平衡的天线部分重量的均方差为 $26.87\text{ N}$ , 该值是被平衡的天线部分重量的 $2.5\%$ ; 2#吊索中的张力与被平衡的天线部分重量的均方差为 $25.50\text{ N}$ , 该值是被平衡天线部分重量的 $3.3\%$ , 均未超出 $5\%$ 的范围。

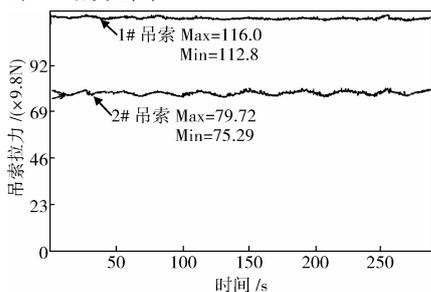


图3 真空低温下吊索张力曲线

Fig. 3 The cable tension at low temperature under vacuum condition

从测试结果看, 吊索的张力在真空低温环境下有较大的变化。其中, 由于温度变化导致吊索收缩而引起的张力变化通过计算得出: 1#吊索 $14.71\text{ N}$ , 2#吊索 $9.8\text{ N}$ 。其余的部分则是由摩擦等因素引起的吊索张力波动。

#### 4.2.4 展开阻力矩测试结果

试验过程中对天线展开阻力矩进行了测试。真空低温下的阻力矩较常温情况下的展开阻力矩增加了近一倍, 减去由于地面零重力设备附加的阻力矩后, 能够满足展开力矩裕度大于1的要求。同时, 由于试验温度考虑了在最恶劣的工况上增加了温度余量, 且地面试验时还受到附加的试验用电缆阻力、附加的工装惯量、展开工装摩擦阻力等因素的影响, 因此实际在轨的力矩裕度会更大。

#### 4.2.5 应变测试结果及分析

##### (1) 校准样应变测试结果及分析

使用了两个应变测点校准样, 从测试结果可知, 在常温—低温—展开—回温—常温的整个过程中, 测点应变随温度降低稍有变化; 当温度回至常温时, 测点应变恢复到初态。将校准样应变测点的测试结果与常压室温条件下的理论应变值进行比较, 整个应变测量系统不确定度为 $5\%$ 。

##### (2) 天线内板和外板应变测试结果及分析

天线内板和外板各测点的应变变化规律类似, 都是随温度降低而增大。在整个试验过程中, 除部分测点的应变值为 $400\sim 600$ 多 $\mu\epsilon$ 外, 大多数测点的应变值在 $300\mu\epsilon$ 以内; 当整个试验环境温度回至常温时, 各测点的应变都回至很小( $0\sim$ 几十 $\mu\epsilon$ )。

## 5 结束语

国内首次对大型复杂天线模拟实际空间温度分布进行了真空低温展开试验, 试验验证了大型天线展开机构真空低温下的展开性能, 获取了展开阻力矩、吊索张力、结构应变等重要数据, 对大型空间展开机构的试验验证方法进行了有益的尝试, 试验取得了成功, 为后续大型空间展开机构的地面试验验证积累了经验。

#### 参考文献 (References)

- [1] QJ 1446A—1998, 卫星热真空试验方法[S], 1998