

# 充气天线形面测试方法研究

王宏建<sup>1</sup>, 徐彦<sup>2</sup>, 关富玲<sup>2</sup>, 刘广<sup>1</sup>

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;

2. 浙江大学空间结构研究中心, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**采用非接触光学照相方法对充气抛物面天线进行形面误差分析和测试, 利用最小二乘法拟合充气天线的抛物面形面。讨论了形面精度测试时的误差源, 分析了影响充气天线电性能的主要因素, 结果显示充气天线适用于低频高增益的使用需求。

**关 键 词:**充气天线; 最小二乘法; 形面精度

**中图分类号:** TN 821 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2010)02-0268-04

## 1 引 言

由于现代微波遥感、对地观测的分辨率不断提高, 使得天线的尺寸越来越大, 迫切需求一种新型天线降低天线重量和发射时的尺寸。充气天线以柔性复合材料薄膜构造, 经过折叠包装和展开过程形成大型空间结构。与传统的可展开天线相比, 充气天线具有以下优势: ①大幅度提高天线尺寸, 折叠后体积很小, 同时质量也大幅度降低(比传统的可展开天线轻一半左右), 大大降低了载荷质量; ②充气天线具有可靠性高、动力学特性好、热稳定性好、应力不易集中等优点; ③易实现性。充气天线研制是涉及空间轨道环境、复合材料、结构、力学、传热学、电磁学、数值算法等多学科的复杂任务。

充气天线材料、结构分析设计、动力学分析都基本成熟, 加工工艺相对复杂和繁琐, 但随着加工工艺的不断改进误差会不断减小, 值得关注的是充气天线的性能检测。国外有关于充气天线方向图的测试, 但是远场测试时天线需要转动, 外场温度变化也很剧烈等等, 所有这些因素导致充气天线电性能测试非常困难并且也不够准确, 除非采用封闭、相对恒温的天线近场测试才能最大限度消除可能的外界影响。

目前充气天线的测试方法主要还是天线的形面光学测试, 对形面测试采用光学照相和电子经纬仪, 两种方法均要在天线形面粘贴多个感光靶点。文章

采用最小二乘法拟合出充气天线的形面误差, 分析形面误差对天线电性能的影响, 对可能造成测试误差源进行了分析, 并对充气天线的适用范围进行了讨论。

## 2 充气天线的形面精度测量

采用非接触光学测量法测量柔性反射面, 由于形面本身精度很高, 要求测量仪器具有高测量精度。选择合适的测量技术和测量仪器是反射面精度测量的关键。利用基于 PhotoModeler 软件建立的摄像测量系统对充气反射器模型进行精度分析和展开过程动态测量, 实现非接触测量。由于照相中的图像是没有尺寸的, 必须根据标尺确定照相中的图像和实际模型的尺寸比例, 即标尺的测量得到长度和实际长度的比值。测量得到的“点云图”按尺寸比例缩放, 然后与设计理论抛物面进行比较, 即可得到反射面的精度 RMS。

对于几何对称的目标物来说, PhotoModeler 给出的空间三维坐标点并不是关于某个坐标轴对称的, 这给后期的数据处理带来麻烦, 因此首先进行目标测量点的空间直角坐标的旋转和平移变换。通过 PhotoModeler 获得的空间坐标点形成的抛物面如图 9 所示, 它的对称坐标系  $(x', y', z')$  原点在初始坐标系  $(x, y, z)$  中的坐标为  $(k_0, h_0, z_0)$ ,  $(x', y', z')$  坐标系的三向坐标轴和  $(x, y, z)$  的三向坐标轴成夹角  $\alpha, \beta, \gamma$ 。拟合充气天线抛物面的方法采用最小二乘法, 选择合适的初始方程可以较快得到拟合结果。

收稿日期: 2009-11-02; 修订日期: 2010-01-27

基金项目: 国家 863 项目“充气可展开天线技术研究(2006AA12Z137)”, 中国科学院空间科学与应用研究中心创新项目“星载双极化双波束微阵列天线关键技术研究”项目支持。

作者简介: 王宏建(1969—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为星载天线理论与分析、计算电磁学等。E-mail: hjwang@nmrs.ac.cn。

### 3 照相测量

充气天线结构示意图见图1所示,由充气式抛物面反射器、支撑圆环、3个连杆支撑结构组成。反射面口径3 m,焦距1.5 m,频率6.6 GHz,抛物面反射面呈双凸透镜状,背面是抛物面反射器,前面是遮波罩。反射面由几十个薄聚酯薄膜膜片(Kapton-E)组成,为了确保良好的反射面精度,以一定的充气压力将它加压到一定的充气压强;透射面也由几十个薄三角形聚酯薄膜膜片(Kapton-E)构成,不过是透波的。支撑圆环和充气杆结构采用较厚的Kevlar制成,具有足够的硬度支撑起整个天线。

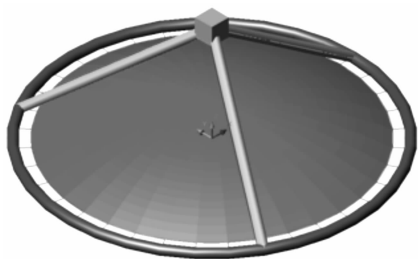


图1 充气天线结构示意图

Fig. 1 Structure of inflatable antenna

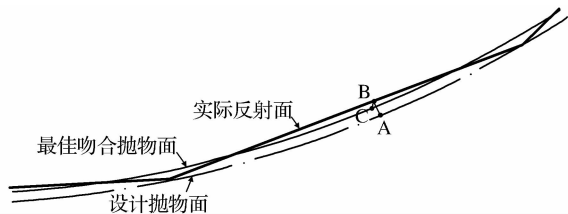


图2 实际抛物面、设计抛物面、最佳拟合抛物面的关系

Fig. 2 Three parabolic reflectors comparison

充气天线的照相测量基本原理是三角测量法。物体的三维坐标由相机的位置和从相机所在平面到物体的光线的夹角计算得到,每个测点至少要在两张照片中得到。影响照相测量技术精度的因素主要有:物体尺寸和相机位置、相片和结果的数目、相片的曝光和对比度、相机透镜性能、数字分析软件的精确性。测量系统的组成包括:PhotoModeler Pro 软件,包括目标点编号模块和动态测量模块;目标点胶片及胶片投影仪;数码相机;相机校准纸板;测量标尺。采用精密测量用标尺,标尺具有极低的热膨胀系数,长度随环境条件的变化极小,标尺两端有反射靶子,在照片中强光显示。

### 4 拟合抛物面和测试误差分析

#### 4.1 拟合抛物面

采用最小二乘法拟合抛物面时选择  $z = c_1 +$

$c_2(x^2 + y^2)$  作为初始方程,依据高方程拟合抛物面及求最小均方根值。这种方法在三角形上取10个点,计算这10个点到最佳拟合抛物面的距离的平方和。这种形式的方程假设拟合抛物面的顶点只在  $Z$  轴上移动,将方程形式变换一下,即设拟合抛物面方程为  $\frac{X^2 + Y^2}{4f'} + H = Z$ ,其中  $f'$  为拟合抛物面的焦距,  $H$  为顶点位移。

原设计抛物面上的点和对应实际反射面上的点有一定的位置误差,实际反射面上的点既不在设计抛物面上,也不在最佳吻合抛物面上。因结构偏差是微小的,所以  $B$  点至最佳吻合抛物面的法线方向余弦近似等于原设计抛物面上  $A$  点的法线方向余弦。由  $B$  点向最佳吻合抛物面做法线  $BC$ ,交于  $C$  点,令  $BC = \Delta$ 。这里  $\Delta$  为代数量,当最佳吻合抛物面在实际反射面内侧时为正,反之为负。

图3中顶点在原点、开口向下的旋转抛物面方程可以写成:

$$y^2 + x^2 = 4F(-z) \quad (1)$$

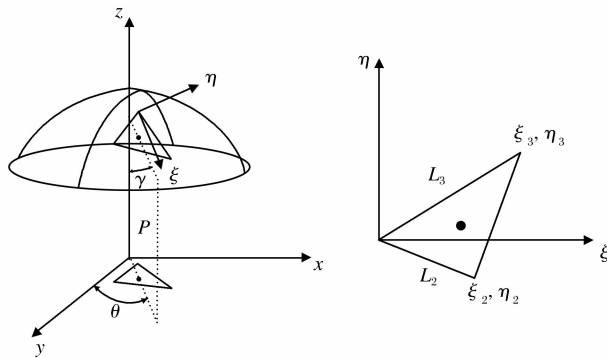


图3 三角形在抛物面中的位置

Fig. 3 The gore's position in the reflector

每个三角形对应抛物面上各点的两个垂直方向的主曲率近似取三角形形心沿  $z$  轴延伸与抛物面交点处的曲率。则:

$$\begin{aligned} R_{\xi} &= 2F(1 + (r_c/2F)^2)^{3/2} \\ R_{\eta} &= r_c \sqrt{1 + (2F/r_c)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $r_c$  为该点的矢径,  $r_c^2 = y_c^2 + x_c^2$ 。有效反射面的方程可以用  $F'$  代替  $F$ 、 $-\delta - z$  代替  $-z$  得到,即有效反射面方程为:

$$y^2 + x^2 = 4F'(-\delta - z) \quad (3)$$

其中:  $F'$  和  $\delta$  使 RMS 值最小。为了得到  $F'$ 、 $\delta$  和  $a$  关系,做一条过三角形形心且垂直于三角形平面的直线,直线的方程可以写成关于矢径  $r$  和  $z$  的方程,  $r^2 = y^2 + x^2$ 。

$$z = z_c + (r - r_c) / (\sqrt{B^2 + C^2}) \tag{4}$$

联立解方程(3)、(4) 得到直线穿过抛物面处的矢径  $r_q$  :

$$r_q = \frac{-2F}{\sqrt{B^2 + C^2}} + 2\sqrt{\frac{F^2}{B^2 + C^2} + F\left(-z_c + \frac{r_c}{\sqrt{B^2 + C^2}}\right)} \tag{5}$$

同样直线穿过有效反射面处的矢径可以通过联立解方程(4)、(5) 得到:

$$r_p = \frac{-2F'}{\sqrt{B^2 + C^2}} + 2\sqrt{\frac{F'^2}{B^2 + C^2} + F'\left(-\delta - z_c + \frac{r_c}{\sqrt{B^2 + C^2}}\right)} \tag{6}$$

因此:

$$x_q = -r_q^2 / 4F \quad x_p = -r_p^2 / 4F' \tag{7}$$
$$a = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (r_p - r_q)^2}$$

在数值计算中, 对于一个三角形就要采用上面的方法计算一次  $\phi$ , 且要对  $F'$  和  $\delta$  求导使  $\phi$  最小。在整个网格区域内的程序计算就变得困难。因此采用上文中叙述的对三角形取点的方法计算  $F'$  和  $\delta$ , 再将它们作为已知量代入公式(7) 中。这样在每个三角形中都是完全的数值计算, 为程序的计算提供便利。对于实际反射面, 所有杆件的长度都有细微的差别, 因此对每个三角形进行数值计算就更加精确, 这样累加得到的  $\phi$  除以三角形的总面积就是 RMS。

4.2 测试误差分析

形面充气天线形面的测试误差包含两大类: ①待测物—反射面的形面精度误差; ② 测量系统本身误差。根据充气天线的一般误差精度, 测量系统本身误差一般很小可以忽略不计。

反射面的形面精度误差主要由以下因素决定:

(1) 外界环境因素: 温度、湿度、风、重力、空气气压等。

温度: 由于充气天线形面测试根据大小一般需要几个小时, 在此过程中温度变化引起形面变化是十分明显的。根据理想气体状态方程, 温度变化会引起压强、体积的变化, 而压强变化引起柔性反射面形面变化, 对于本项目 3 m 口径 1.5 m 焦距充气天线来说, 其充气气体量是相当大的, 实际充气气体量大约为 1.5 m<sup>3</sup>。

重力: 根据密度这些气体有 1.94 kg, 这些重量对于一般刚体天线来说可以忽略不计, 但对于柔性

充气天线会引起一定的形面变形, 抛物面里面气体下沉造成形面下凸上凹。

气压: 由于外界气压的变化, 充气天线内部的压力是相对外界而言的, 外界气压变化导致内外压差也随之变化, 由此也会引起测试误差。

风的影响则更难以量化, 即使是人员走动都会带来一定的轻微扰动, 从而引起测试误差。

(2) 反射面粘贴靶点引起的应力和张力。

采用光学测试必须在反射面粘贴靶点, 这些靶点对于充气天线来说是附属物, 附属物引起天线表面张力、应力发生变化, 此外多达几百个靶点也会引起充气天线重量的变化。

总之, 由上述误差源拟合得出的拟合曲面和理想抛物面比较, 得出充气抛物面天线的平面均方根误差和充气天线本身的误差有一定差距, 并且有些误差目前是无法消除的。

4.3 充气天线的形面调整及形面均方根误差

加工完成后的充气天线见图 4 所示, 充气天线和一般的刚体天线不同在于其可调整性。柔性薄膜形面的调整有其特殊之处, 各调整点之间不是互相独立的, 而是具有很强的非线性。必须测量和调整交替进行且重复多次才能使精度逐渐提高。将每次测量得到的目标点三维坐标和抛物面比较, 根据两者的偏差来决定各调整点绳索的收放。经过重复地调整 and 测量不断接近抛物面, 精度得到较大的提高。经过多次反射面的调整后, 充气天线多次测量的均方根误差 RMS 为: 1.83 mm (第一次), 1.36 mm (第二次), 测量系统的测量精度为 0.032 mm, 需要指出的是该天线目前的均方根指标经过精调后还可以提高, 并且目前的天线只是试验件, 不是最终产品。



图 4 加工完成的充气天线

Fig. 4 The inflatable antenna under test

## 5 形面均方根误差对天线性能影响以及讨论

一般设计抛物面天线时均采用理想抛物面,除非专门的赋形方向图设计时采用特殊的反射面。因此,实际加工后充气天线和理想抛物面有一定的差距,拟合后得到的均方根误差使得天线电性能和理想抛物面也有不同,不同的均方根误差造成的天线增益下降为:

$$\eta_s = \frac{G}{G_0} \approx 684 \left( \frac{\bar{\epsilon}}{\lambda} \right)^2 (\text{dB}) \quad (8)$$

其中: $G$ 为有表面误差的天线增益, $G_0$ 为无表面误差的天线增益, $\bar{\epsilon}$ 是表面的均方根误差值。对于本项目 6.6 GHz 频率来说,其均方根误差是波长的0.04倍,由于充气天线反射面的均方根误差造成的增益损失约为 1.1 dB,同时也可以看出同样的形面均方根误差,频率越低增益损失越小,因此充气天线更适合低频段使用。

事实上引起充气天线增益下降的因素很多,包括反射面形面误差、馈源和抛物面的装配位置、天线测试电磁环境、测试设备误差等等;其中反射面形面误差引起的增益降低只是很小的一部分。对于 40 dB 以上的高增益天线来说,1.1 dB 的增益损失不会带来太大影响。馈源、反射面装配误差却是必须要注意的,由于充气天线的柔性结构,不可能引入电子经纬仪等高精度设备来标定其装配位置,况且柔性结构也没有可以固定的安装点,因此馈源和反射面之间基本上需要空间绝对坐标来保证,其工程量将是非常大的,而无论馈源的横向偏焦还是纵向偏焦都会引起增益的较大下降以及方向图畸变,因此充气天线研制是个系统工程,仅靠抛物面形面精度是不能保证天线性能的。

## 6 结 语

文章采用非接触光学照相方法对充气抛物面天线进行形面误差分析和测试,对形面测试过程中可能的误差源进行了分析;利用最小二乘法拟合充气天线的抛物面形面,得到抛物面形面的均方根误差。讨论了均方根误差对天线方向图和增益的影响,结果显示充气天线受加工工艺、测试环境、测试方法的不同形面偏差有较大差异,充气天线非常适用于低频段应用。

### 参考文献:

- [1] Xu Yan, Guan Fuling, Wang Hongjian. Reflector and Thermal Analysis of Plan-parabolic Membrane Antenna [J]. Chinese Journal of Space Sciences, 2009, 29(5): 534-539. [徐彦, 关富玲, 王宏建. 平面一抛物面型薄膜天线形面及温度分析[J]. 空间科学学报, 2009, 29(5): 534-539.]
- [2] Chen Gengchao. The Technique Used to Adjust Flexible Antenna Reflector [J]. Machinery Design & Manufacture, 2003, 6: 67-68. [陈庚超. 柔性天线反射面调整技术[J]. 机械设计与制造, 2003, 6: 67-68.]
- [3] John K H, Lin, David P. Cadogan an Inflatable Microstrip Reflectarray Concept for Ka-Band Applications, 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference & Exhibit [M]. Atlanta Georgia, 2000.
- [4] VanBlaricum M L. Quick Feasibility Demonstration for an Inflatable Antenna System in Space [C]//Proceedings of the Ninth Annual DARPA Symposium on Photonic Systems for Antenna Applications Naval Postgraduate School, Monterey, 1999.
- [5] Xu Yan, Guan Fuling, Guan Yu. Precision Analysis and Shape Adjustment of Inflatable Antenna [J]. Chinese Journal of Space Sciences, 2006, 26(4): 292-297 [徐彦, 关富玲, 管瑜. 充气可展天线精度分析和形面调整[J]. 空间科学学报, 2006, 26(4): 292-297.]

## The Surface Measurement of Inflatable Parabolic Antenna

WANG Hong-jian<sup>1</sup>, XU Yan<sup>2</sup>, GUAN Fu-ling<sup>2</sup>, LIU Guang<sup>1</sup>

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Space Structure Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Non-contact photo Modeler system is used to detect the surface error of inflatable parabolic antenna, least squares method is utilized to obtain the RMS of the parabola. The possible errors are analyzed during the surface RMS measurement, the main factors that influence the inflatable parabolic antenna performance are also discussed.

**Key words:** Inflatable parabolic antenna; Least squares method; Surface error