

【其他研究】

空间充气可展天线反射面精度测试分析

胡宇, 陈务军, 董石麟

(上海交通大学 空间结构研究中心, 上海 200030)

摘要: 采用相位和立体视觉技术相结合的白光扫描技术测量了抛物面在不同压强下的形面状态, 分析了天线形面褶皱分布情况。使用数学软件 Matlab 拟合出不同压强作用下抛物面反射面的方程, 将这些方程与设计值进行对比, 分析了充气可展天线反射面在各压强作用下的形面精度。结果表明: 不同压强作用对充气可展天线反射面精度有显著影响。

关键词: 充气可展天线; 抛物面反射面; 形面精度; 白光扫描技术

中图分类号: V214; O312

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2011)08-0109-04

充气可展天线因具有重量轻、收纳率高、可靠性高和费用低的显著特点正得到广泛的关注。随着宇航事业的快速发展, 航天领域对空间天线反射面精度提出了更高要求, 其中结构表面的准确度控制技术是至关重要的环节。空间可展天线反射面有效口径、反射面精度(双程误差 RMS)是决定其特性的重要因素。充气展开结构的高表面精确度是基本要求, 而实际构型曲面与理想抛物面存在偏差, 这将影响结构性能和任务性能, 如电信号旁瓣、增益、结构薄膜屈服强度等^[1-2]。

美国 NASA 的 JPL、L'Garde 公司、LRC 实验室, 欧空局, 俄罗斯等对空间天线反射面精度开展了相关研究^[3-4]。Naboulsi^[5]研究了荷载、边界条件对形面精度的影响。充气天线在国内的研究较少, 徐彦^[6]运用有限元法进行反射面的形面精度分析, 提出了形面调整方法并进行了实验验证。哈工大运用无矩理论对充气天线反射面进行结构分析, 提出了精度的预测方法, 为充气天线的反射面设计和优化提供依据^[7]。

本文通过对设计并已制作的充气天线形面进行了实验测试, 对该充气可展天线形面误差及精度进行了深入分析。

1 充气反射面的设计及制作

目前抛物面反射面的成形方法主要有 2 种: 整体浇注成形和基于理想抛物面的分瓣裁切粘合成形。基于理想抛物面的分瓣裁切粘合成形法是用预先裁切下来的平面膜片拼接粘合成设计的构型抛物面, 其实质是用可展面近似逼近非可展面^[8-10]。

原模型充气可展天线总体设计中, 口径为 3 000 mm, 深度为 170.292 mm; 反射面为抛物面 $x^2 + y^2 = 13\ 212.619z$, 焦

距 3 132.863 mm, 三根充气支撑管 $\varnothing 150@120^\circ$ 设置在外 18 边形充气支撑环。本实验采用的充气可展天线为分瓣裁切粘合成形设计, 该天线口径 1 000 mm, 深度 170.292 mm, 采用不锈钢管 $\varnothing 50 \times 1.5$ 设置在外 18 边形支撑环。反射面为抛物面 $x^2 + y^2 = 1\ 468.07z$ 。外连裙边 18 边形, 支撑环也为 18 边形。反射面与天蓬投射面对称, 均采用一致抛物面, 分别由 18 片缝合而成。



图 1 充气可展天线实物^[11]

2 试验目的及方案

2.1 试验目的

1) 采用相位和立体视觉技术相结合的白光扫描技术测量, 精确测定整体形面, 检验设计方法的有效性, 评价制作工艺方法的影响。

2) 测量经向粘合缝、裙边与反射面接合点、裙边的边缘和角部等局部褶皱扩展变化, 揭示其受力与工作机理。

2.2 试验方案

天线采取 2 种放置状态进行测试: 水平放置测试和悬挂

收稿日期: 2011-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878128, 50808122)

作者简介: 胡宇(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事膜结构研究; 通讯作者 陈务军(1969—), 男, 教授, 博士生导师。

垂直放置测试。分别在气压表读数为0 Pa、1 Pa、3 Pa、5 Pa、7 Pa(由于实际气压波动和不稳定,可记录具体气压值)时对天线形面运用三维摄影扫描仪进行扫描,该扫描仪可以将拍摄所得图像传输到计算机,计算后输出结果。

2.3 实验过程

2.3.1 天线悬挂垂直放置

首先对天线悬挂垂直放置时进行扫描测量(图2)。在充气过程中,气压表的读数是变化的,为了使天线内部保持不变的压强,必须始终保持对天线内部充气,并且要保持对气压表的观察,要使气压表的读数保持在一个较为稳定的值。在测量时要求气压表保持在0 Pa、1 Pa、3 Pa、5 Pa、7 Pa时对天线的表面进行测量,在测量期间,不允许触动天线的位置,目的是保持天线在每种工况下测量值整体在同一坐标系下。三维摄影测量系统将拍摄所得图像传输到计算机,计算后输出结果。



图2 天线悬挂垂直放置

2.3.2 天线水平放置

天线水平放置进行扫描(图3)与天线悬挂垂直放置时相同,实验过程与天线竖直放置也基本相同。需要注意的是,实验过程中为了保持天线在每种工况下测量值在同一坐标下,一定不能触动天线。使用三维摄影测量系统测出在天线气压值稳定在0 Pa、1 Pa、3 Pa、5 Pa、7 Pa时的实验结果。



图3 天线水平放置

3 实验结果分析

3.1 结果图像

3.1.1 水平状态下实验结果

由图4中可以看出,随着压强的增大,天线表面整体越

来越紧绷,褶皱也随之减少。裙边也越来越紧绷,裙边褶皱也越来越少。在天线的中心处褶皱也会随着压强的增大而减弱,但趋势没有天线其他区域褶皱减少的明显。相对而言,中心处褶皱会随着天线压强增大而变得越明显。

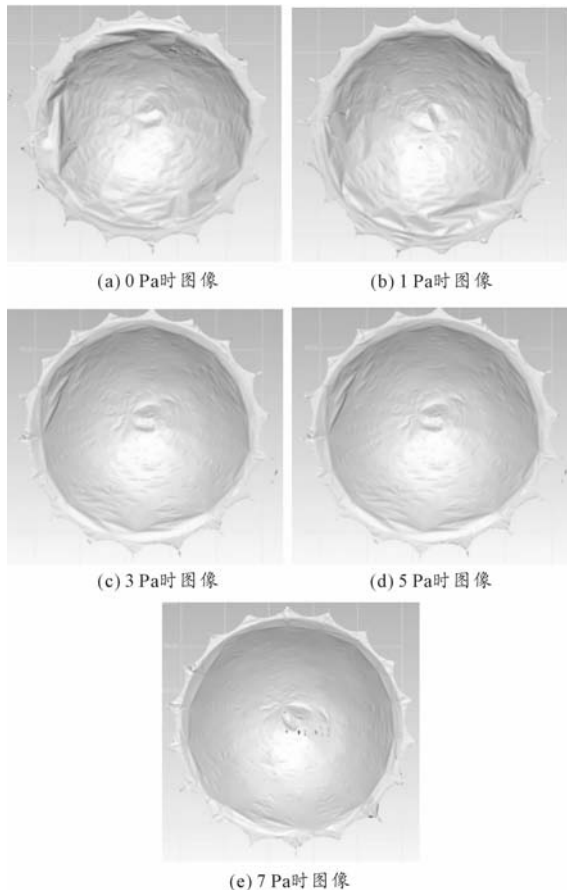


图4 水平状态下形面图像

3.1.2 竖直状态下的实验结果

由图5中可以看出,随着压强的逐渐增大,天线与裙边表面整体越来越紧绷,天线与裙边褶皱也越来越减少。在天线的中心处褶皱也会随着压强的增大而减弱,但趋势没有天线其他区域褶皱减少的明显。相对而言,中心处褶皱会随着天线压强增大而变的越明显。

从图4和图5可以观察到:随着压强的增加,天线表面的褶皱变越来越不明显,裙边的也越来越绷直。水平情况下,褶皱较均匀;竖直情况下,天线上部褶皱较多,下部褶皱较少。经分析可知,水平状态下形面所受重力是均匀分布的,所以褶皱的分布很均匀;在竖直状态下,由于形面本身受重力作用且重力分布不均匀,所以形面的褶皱分布不均匀。但在抛物面的中心区域,随着压强增大,褶皱相对愈加明显。这种情况与抛物面受力有关,抛物面为非等应力曲面,抛物面内两主曲率方向张力的应力比值与内气压无关,决定于抛物面函数,随着抛物面深度的增大而逐渐减小,并收敛于1:2。故在抛物面的中心区域,褶皱相对愈加明显。

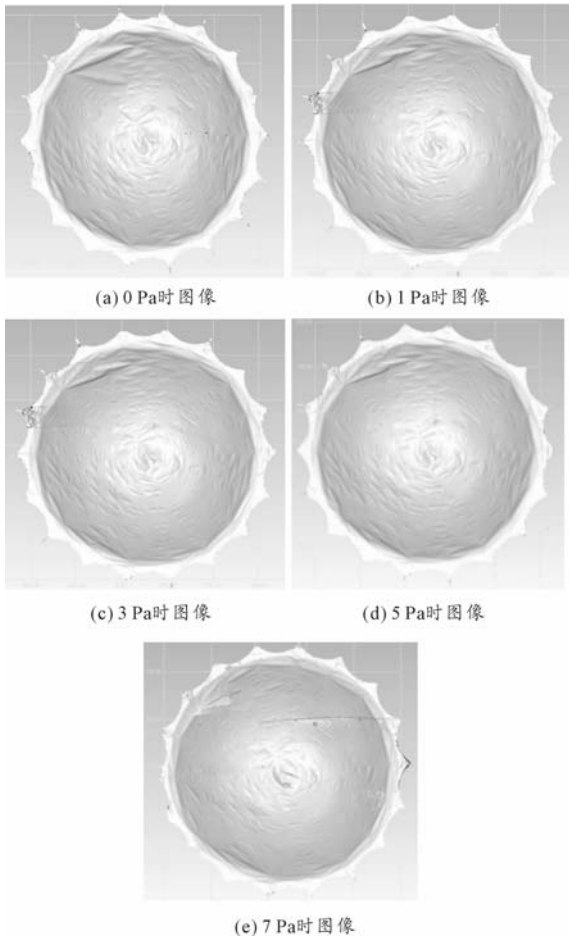


图5 竖直状态下形面图像

3.2 数据处理

3.2.1 数据选取

经过实验仪器的精密测量,可以得出形面上百万点的坐标。由于这些点的数量过于巨大,为了简化计算,选取某一部分有效的点进行数据处理。

由图6和图7可以看出选取点的原则,即通过形面8向的选取点,这种选取方式可以更加全面地、有效地保持形面的全面性与完整性,使得在使用 Matlab 软件拟合形面方程时能更加全面地体现形面特征。

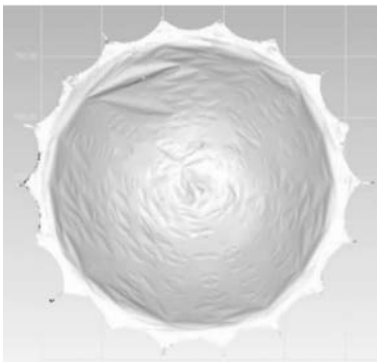


图6 选点前形面

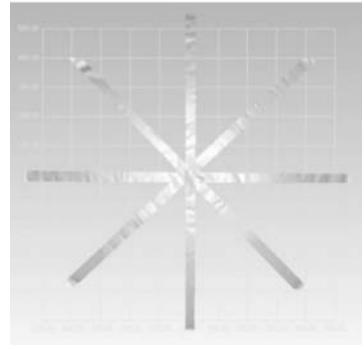


图7 选点后形面

3.2.2 数据拟合

为了研究充气可展天线形面精度,需要将试验测试结果的数据进行处理。通过数学软件 Matlab 实现曲面的拟合, Matlab 软件工具箱中有 surface fitting tool 功能,可以实现拟合。在拟合的方式中,选取 Polynomial Fit Type 进行拟合,即多项式拟合方式。这种拟合方式可以选择 x 、 y 的最高指数,由于已经知道该天线为抛物面,故 x 、 y 最高指数均为 2,在拟合结果中, xy 项的系数与 x^2 、 y^2 项的系数相比相差太大,可以忽略,由此可以得出拟合曲面方程。

在竖直与水平状态下分别对每种压强状态下的形面点的数据用 Matlab 进行处理,拟合出每种状态下的曲面方程。

抛物面设计方程为 $F(x, y) = -0.000\ 681x^2 - 0.000\ 681y^2$,其中表1中方程为标准方程。由表1可以看出方程 x^2 、 y^2 前面的系数数量级相同,且系数大小也很接近,说明抛物面在各个压强下的形状很接近,整体形状特征没有太大变化,并且 x 、 y 前面的系数均与设计值很接近,说明天线制作整体没有太大失误,也说明实验的精度比较高。表1中 x^2 、 y^2 内的系数为零,说明抛物面方程的顶点均在原点,但实际测量的过程中没有指定特定的原点,所以每次测量抛物面都属于不同的坐标系,表1中方程实际为所拟合曲面方程平移至标准坐标系下的标准方程。对比 x^2 、 y^2 前的系数,可以知道随着压强的增大, x^2 、 y^2 前的系数差异大致增大,水平与竖直状态下均为 7 Pa 压强时两系数差异最大。对于拟合的结果,水平与竖直状态下均为 3 Pa 和 7 Pa 时最为接近实验测得天线状态。

3.2.3 拟合结果精度分析

由表2可知,由于各个方程在不同坐标系下测得,故在计算精度时要将原设计方程移至相应压强作用下的坐标体系下,分别对每个方程取有限个点(这些点的 x 、 y 坐标相同, z 坐标不同,并且在图像上),对这些点的 z 坐标与设计值的 z 值进行偏离程度的计算,即均方差计算。由计算得出结果(如表2)可知:在竖直 5 Pa 状态下,方程与设计值的偏差最小,故竖直 5 Pa 状态下精度最高,水平状态下水平 7 Pa 精度最高。

表1 天线竖直与水平状态下标准方程表达式及均方根误差值

状态	方程	均方根误差/mm
竖直 0 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 742\ 4y^2 - 0.000\ 743\ 6x^2$	2.01
竖直 1 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 732\ 3y^2 - 0.000\ 731\ 7x^2$	2.27
竖直 3 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 740\ 6y^2 - 0.000\ 728\ 1x^2$	1.54
竖直 5 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 732\ 7y^2 - 0.000\ 729\ 0x^2$	2.71
竖直 7 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 751\ 7y^2 - 0.000\ 726\ 5x^2$	1.42
水平 0 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 743\ 3y^2 - 0.000\ 744\ 9x^2$	3.24
水平 1 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 743\ 5y^2 - 0.000\ 745\ 1x^2$	3.12
水平 3 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 751\ 3y^2 - 0.000\ 739\ 5x^2$	1.54
水平 5 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 751\ 1y^2 - 0.000\ 734\ 6x^2$	2.19
水平 7 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 743\ 8y^2 - 0.000\ 726\ 4x^2$	1.95

表2 不同压强作用下抛物面拟合方程与设计值之间的精度

状态	拟合方程	设计方程	方差/mm
水平 0 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 743\ 3y^2 - 0.000\ 744\ 9x^2$		6.13
水平 1 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 743\ 5y^2 - 0.000\ 745\ 1x^2$		7.23
水平 3 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 751\ 3y^2 - 0.000\ 739\ 5x^2$		5.93
水平 5 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 751\ 1y^2 - 0.000\ 734\ 6x^2$		6.58
水平 7 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 743\ 8y^2 - 0.000\ 726\ 4x^2$	$F(x,y) = -0.000\ 681x^2 -$	5.46
竖直 0 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 742\ 4y^2 - 0.000\ 743\ 6x^2$	$0.000\ 681y^2$	7.27
竖直 1 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 732\ 3y^2 - 0.000\ 731\ 7x^2$		5.30
竖直 3 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 740\ 6y^2 - 0.000\ 728\ 1x^2$		5.43
竖直 5 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 732\ 7y^2 - 0.000\ 729\ 0x^2$		4.85
竖直 7 Pa	$F(x,y) = -0.000\ 751\ 7y^2 - 0.000\ 726\ 5x^2$		5.93

4 结论

1) 由于水平状态下形面所受重力分布是均匀的,所以褶皱的分布很均匀;在竖直状态下,由于形面本身受重力作用且重力分布不均匀,所以形面的褶皱分部不均匀。随着压强的增加,天线表面的褶皱变得越来越不明显,裙边褶皱也越来越不明显。水平情况下,褶皱较均匀;竖直情况下,天线上部褶皱较多,下部褶皱较少。

2) 在抛物面的中心区域,随着压强增大,褶皱相对愈加明显。这种情况与抛物面受力有关,抛物面为非等应力曲面,抛物面内两主曲率方向张力的应力比值与内气压无关,决定于抛物面函数,随着抛物面深度的增大而逐渐减小,并

收敛于 1:2。故在抛物面的中心区域,褶皱相对愈加明显。

3) 对比拟合方程 x^2, y^2 的系数,可以知道随着压强的增大, x^2, y^2 的系数差异大致增大,水平与竖直状态下均为 7 Pa 压强时两系数差异最大。

4) 根据拟合的抛物面方程与设计方程之间的精度比较可以看出,2 种放置状态下,竖直状态比水平状态精度更高。在天线竖直 5 Pa 状态下天线形面精度最高,最接近天线设计值下的抛物面方程。抛物面方程与设计方程之间偏离程度比较大,这是由于本实验的天线口径比较小,曲面的曲率较大,天线形面产生的褶皱与口径较大的天线相比更明显,由此造成了抛物面拟合方程与设计方程之间偏离程度较大。

(下转第 119 页)