DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2022.01.011

# 某带罩反射面天线刚强度性能试验设计与验证\*

李建伟<sup>1</sup>,秦强强<sup>2</sup>,韩 冰<sup>2</sup>,周金柱<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十研究所,陕西西安710068;2. 西安电子科技大学,陕西西安710071)

摘 要:文中以某带罩反射面天线为研究对象,设计了模拟复杂环境载荷的曲面天线刚强度性能试验,通过风洞 试验验证了设计试验的可行性,为电子装备的安全服役提供保障。文中重点讨论了复杂曲面天线模拟风载的近 似加载方式和刚强度性能试验分析方法。最后,对比了模拟风载和风洞试验形变测试结果,发现两种试验方法的 最大误差在6%以下,证明了实验室模拟风载校核天线刚强度性能的可行性。同时,试验结果显示该带罩反射面 天线刚强度满足设计要求。

关键词:反射面天线;刚度;强度;风洞试验

中图分类号:TN82 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2022)01-0060-05

# Design and Verification of Rigidity and Strength Performance of a Reflector Antenna with Cover

#### LI Jianwei<sup>1</sup>, QIN Qiangqiang<sup>2</sup>, HAN Bing<sup>2</sup>, ZHOU Jinzhu<sup>2</sup>

(1. The 20th Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China; 2. Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Taking a reflector antenna with a cover as the research object and a curved antenna rigidity performance test that simulates complex environmental loads is designed in this paper. The wind tunnel test verifies the feasibility of the design test and provides a guarantee for the safe service of electronic equipment. The approximate loading method of the complex curved antenna simulating wind load and the test analysis method of rigidity and strength performance are mainly discussed. Finally, by comparing the simulated wind load and the wind tunnel test deformation test results, it is found that the maximum error of the two test methods is lower than 6%, which proves the feasibility of the laboratory simulation wind load to check the rigidity performance of the antenna. At the same time, the test results show that the rigidity and strength of the reflector antenna with a cover meet the design requirements.

Key words: reflector antenna; rigidity; strength; wind tunnel test

## 引 言

反射面天线具有结构简单、可靠性高、增益高、副 瓣低等特点,广泛应用在射电天文、载人航天等重大工 程项目中。随着科学技术的发展,对反射面天线电性 能的要求愈来愈严苛,而天线的机械结构是实现天线 电性能的载体,合理设计天线的机械结构是提高天线 电性能的一个关键因素。此外,天线在服役期间的优 良机械结构性能是保证电性能可靠的关键因素。文献 [1]针对极端温度应用场景,采用有限元软件分析了 反射面天线在极端热载荷下的变形,并针对热变形分 析了其对反射面天线电性能的影响。文献[2]针对碳 纤维蜂窝夹层天线在重力、热及固定方式作用下的变 形进行了研究,采用有限元分析方法对天线进行热-结构耦合的变形分析。文献[3]研究了影响星载反射面 天线型面热变形的因素,仿真分析了反射面厚度、支撑 位置、选用材料等因素对热变形的影响。文献[4]提出 了一种面板装配变形仿真和控制方法,考虑装配顺序、 装配预紧力和重力对面板装配的影响,进行了面向装 配过程的面板装配变形动态仿真。文献[5]基于变形 后主面点的空间坐标值,提出了三自由度下的非线性 最小二乘吻合方法,利用空间几何关系严格推导了服 务于天线指向误差修正的俯仰和方位的精确调整量, 构建了主面变形与指向误差之间的间接关系。文献 [6]分别从有限元仿真和振动环境试验两个方面对天 线阵面的抗力学环境适应性进行分析验证,验证了设

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-10-01

基金项目:国防科研项目(TDGC-CL-19-052-2);国家自然科学基金资助项目(52175247,51775405)

计天线阵面的设计合理性。

以上文献的天线变形信息均来自有限元仿 真<sup>[7-9]</sup>。随着天线结构采用的复合材料越来越多, 受材料参数、复合工艺等不确定因素的影响,有限元仿 真难以模拟真实的复合材料天线结构<sup>[10-12]</sup>。为了保 证天线服役状态的可靠性,有必要借助试验方法对天 线的刚强度等性能进行进一步验证。

文献 [13] 以舰载天线罩为研究对象,分析了天线 罩在复杂载荷下刚强度性能的试验分析方法,但该方 法只适用于平面结构,无法对复杂曲面结构进行试验。

本文针对工作状态的某带罩反射面天线在风载作 用下可能产生破坏和失稳的现象,提出了适用于复杂 曲面天线的刚强度试验方法,设计了模拟风载的形变 测试装置,实现了对某雷达天线结构刚强度的校核,通 过风洞试验验证了所提出的试验方法的可行性,可指 导同类天线的模拟风载测试。

#### 1 产品及实验条件

反射面天线通常由馈源、主反射面及副反射面组 成,主反射面与副反射面裸露在空气中。本文研究的 某带罩反射面天线长时间在舰体上服役,易受到风载、 暴雨、盐雾及湿热环境的冲击。天线主反射面与副反 射面的型面精度是保证电性能的基础。为了保证天 线服役的可靠性,在牺牲一定电性能的前提下,在天线 的外侧设计了天线罩,以保护其内部结构。某雷达天 线主要由馈源、主反射面、天线罩和副反射面组成。其 中副反射面通过复合成型技术镶嵌在天线罩中,主反 射面通过螺栓与天线罩连接,具体结构与原理如图1 所示。





该雷达天线受服役条件的约束,经常受到风载作 用。实验室模拟自然风载通常采用风洞试验、水压与 沙子重力。风洞试验价格较为昂贵,不利于实验室研 究的开展;对于复杂曲面天线,水压不利于保证施加压 力的均匀性。因此为了减少夹具复杂性同时降低试验 成本,本文利用沙子流动性较小和密度较大的特性,通 过沙子重力模拟风载,测量天线在模拟风载下的位移。 为了保证在曲面天线各位置施加均匀的压力,需要加 工与天线共形的挡板,在天线和共形挡板间填充等厚 度的沙子以保证压力均匀。

参考国标GB 50009—2001"建筑结构载荷规范",风载等效的压力W可以通过公式(1)计算:

$$W = nK_0 K_z W_0 \tag{1}$$

式中:n为安全系数; $K_0$ 为风载体型系数; $K_z$ 为风载高度变化系数; $W_0$ 为基本风压。

基本风压W<sub>0</sub>按风速v计算:

$$W_0 = \frac{1}{1\,600}v^2\tag{2}$$

根据该雷达天线结构的外形特点,参考国标GB 50009—2001"建筑结构载荷规范"表8.3.1风载体型系数,确定风速对应的风压。天线服役期间受正压风载时,其风载体型系数最类似独立墙壁及围墙的风载体型系数,此时风载体型系数为+1.3。天线罩本身有一定的流线型倾角,在受正压风载时,倾角会引导一部分风载分流,因而降低了天线受到的有效风压。经综合考虑风载体型系数取为+1.1。

风压高度变化系数应根据地面粗糙度类别按表 1确定。地面粗糙度可分为A、B、C、D四类:A类指近 海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区;B类指田野、乡 村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的乡镇;C类指有密 集建筑群的城市市区;D类指有密集建筑群且房屋较 高的城市市区。

表 1 风压高度变化系数

离海平面的	南海亚面的直度/m	地面粗糙度类别			
	肉傳Ⅰ॥n同/2/Ⅲ 「	А	В	С	D
	5	1.09	1.00	0.65	0.51
	10	1.28	1.00	0.65	0.51
	15	1.42	1.13	0.65	0.51
	20	1.52	1.23	0.74	0.51

本文研究的天线一般应用在舰体之上,其工作高 度取海平面10 m高度,舰体通常在大海中航行,最接 近的地面粗糙度类别是A,通常指近海海面和海岛、海 岸、湖岸及沙漠地区。但选择海平面高度10 m的A类 地面粗糙度类别与真实工况稍有差异,因此参考该天 线的实际服役工况,在A类地面粗糙度的基础上加强 了风压变化系数,最终取 $K_z = 1.4$ 。考虑到计算分析 和加工制造中其他不确定因素,取安全系数n = 1.3。 2种风速的风压计算结果见表2。

表 2 风压计算结果					
风速 $/(m \cdot s^{-1})$	风压/( $kN \cdot m^{-2}$ )				
35	1.532				
55	3.785				

## 2 试验夹具

试验夹具应保证被测样件的真实连接方式,并具 有足够的刚度以减小其变形对测试结果的影响。测试 时,在被测天线和共形挡板间填充沙子以模拟风载,填 充沙子的重量依据表2中的风压经换算获得。考虑天 线形变测试方式,采用如图2所示的天线座作为形变 试验支撑装置。



图 2 天线形变测试夹具结构图

天线由蜂窝和蒙皮复合成形,天线座由铝材铸造 而成,因此天线座的刚度远大于天线的刚度。经过有 限元仿真分析发现,在2种风速下,天线座的形变量小 于被测样件形变的1/10,因此本文只考虑天线自身的 变形,而不考虑天线座的变形。图3为天线座在55 m/s 风速下的形变图。



图 3 天线座在55 m/s风速下的形变图

## 3 测点布局

应力测量通常采用电阻应变片和光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG)传感器。变形测量根据 被测样件和加载方式采用不同的方式。常用的方式包 括摄影测量、接触测点传感器测量、激光测距仪测量及 双目视觉相机测量等。

经过预实验,对该研究对象的应力和变形已有了 初步了解,且影响天线电性能的重要因素就是载荷下 的天线形变,因此只对形变进行测量。因天线副反射 面只与天线罩相连接的特殊结构,主反射面和天线罩的法向位移都会叠加到副反射面上。经过电磁仿真分析发现,对电性能产生较大影响的是天线副反射面的 位移,因此本实验只监测副反射面的位移。为了保证 试验的可靠性,采用高精度激光位移传感器测量天线 副反射面的位移,测点布局如图4所示。



图 4 天线罩形变测试测点布局

如图2和图4所示,被测天线固定在主支撑箱体 上,传感器支架固定在主支撑箱体的法兰上。此结构 可以有效避免由主支撑箱体支撑位置变形带来的测试 误差,从而提升测量精度。

#### 4 实验测试

#### 4.1 模拟风载试验测试

实验测试时,在被测天线和共形挡板间填充沙子。 共形挡板用于保证施加在被测曲面天线表面的沙子厚 度相同,即保证施加在天线表面各个位置的压力是均 匀的。

经过风洞试验发现:天线在正压风载下因受力面 积较大,容易产生较大的变形;在侧向风载下,由于天 线罩的锥面形状会产生明显的风流作用,且侧向风载 天线的受力面较小,因而产生的形变远小于正压风载 下的形变。因此文中只考虑正压风载。

为了验证在不同工况下天线发生的是弹性变形还 是塑性变形及随着循环载荷的施加天线的刚度是否有 明显的衰减现象,对每种工况依次加载--卸载5次,测 量每次加载后天线的形变及卸载后的残余形变。经过 实验发现,在2种实验工况下,天线发生的均为弹性变 形,且随着时间的推移,在10 min以内天线形变能恢复 至初始位置。因此本文只给出第1次和最后1次的测 试结果,用于对比分析。

图5给出了模拟风载试验测试系统,图6和图7为 天线在2种工况下的加载--卸载位移图。表3给出了天 线副反射面在工况1和工况2风载作用下的形变测试 结果及卸载后的残余位移。







图 6 35 m/s风速下风压加载--卸载副反射面位移图



图 7 55 m/s风速下风压加载--卸载副反射面位移图

表 3	天线模拟风载下的最大位移和残余位	移
12.0	八戏法风机和门根八位的优乐区	コン

风速/ $(m \cdot s^{-1})$	次数	测点	第1峰值/ mm	第2峰值/ mm	残余位移/ mm
25	第1次	测点1 测点2	$\begin{array}{c} 0.315\\ 0.318\end{array}$	_	$0.003 \\ 0.002$
30	第5次	测点1 测点2	$0.316 \\ 0.315$	_	$0.004 \\ 0.003$
EE	第1次	测点1 测点2	$\begin{array}{c} 0.308\\ 0.312\end{array}$	$0.542 \\ 0.528$	$0.011 \\ 0.008$
55	第5次	测点1 测点2	$0.311 \\ 0.309$	$\begin{array}{c} 0.534 \\ 0.548 \end{array}$	$0.010 \\ 0.009$

从表3可知:在35 m/s风速下天线的最大变形为 0.318 mm,远小于设计要求的0.6 mm,且经过电磁仿 真分析发现,副反射面的位移0.318 mm对电性能的 影响较小,此时天线可以正常服役,证明天线的刚度 满足设计要求:在55m/s风速下天线的最大变形为 0.548 mm, 满足设计要求的55 m/s风速下不发生明显 破坏的条件:在2种工况卸载后天线的残余位移均小 于传感器的测量误差,证明天线的刚强度满足设计要 求。对比图6和图7发现,35m/s和55m/s风速重复加 载--卸载5次,残余位移并无明显的增加,且都在仪器 的测量误差内,再次证明天线的刚强度完全符合设计 要求。

图6中测点1在第1次测试卸载过程中传感器随时 间响应与图7相比存在较大的差异。其主要原因可能 是第1次测试卸载速度比较慢,卸载测点2处对应位置 上的沙子花费时间较多,且卸载速度比较慢,因此测点 1的传感器响应较小,与测点2相比呈现较大的差异。 但经过一段时间卸载完全后,2个传感器的残余位移趋 于一致,即残余位移接近0。

#### 4.2 风洞试验测试

风洞试验测试时,天线固定在如图8所示的空心 钢管中心,位移数据采用图4对应的采集卡采集,传感 器布局及试验工况同模拟风载试验时相同,每次测试 持续10min,分别记录天线在加载--卸载过程中天线副 反射面的位移和残余位移。



图 8 风洞试验测试系统

图9所示为风洞试验形变测试结果,分别给出了 35 m/s风速与55 m/s风速下副反射面的位移。相较 于模拟风载实验,在风洞试验中在风速稳定阶段,副反 射面的位移仍有一定的波动:在35 m/s风载时,副反射 面的位移波动范围约为0.03 mm;在55 m/s风载时,副 反射面的位移波动范围约为0.05 mm。

表4给出了风洞试验的平均位移和残余位移测 试结果。在35 m/s风速下风洞试验测试的最大位移 为0.304 mm, 同模拟实验相比最大误差为4.4%; 在 55 m/s风速下风洞试验测试的最大位移为0.553 mm, 同模拟试验相比最大误差为5.6%。这一方面证明了 天线的刚强度完全符合设计要求;另一方面证明了设 计的模拟风载试验方法的可行性。



图 9 风洞试验副反射面位移及残余位移图

表 4	风洞试验中天线的最大位移和残余位移

风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	测点	第1均值/ mm	第2均值/ mm	残余位移/ mm
35	测点1 测点2	$\begin{array}{c} 0.304 \\ 0.305 \end{array}$	_	$0.003 \\ 0.002$
55	测点1 测点2	$\begin{array}{c} 0.320 \\ 0.318 \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.558 \\ 0.546 \end{array}$	$0.007 \\ 0.005$

### 5 结束语

针对复杂曲面天线刚强度校核中存在的有限元仿 真不准确和风洞试验昂贵的问题,本文针对需要校核 刚强度的复杂曲面带罩反射面天线提出了模拟风载的 形变测试方法,并通过风洞试验对模拟风载试验进行 了验证,实验结果表明:

风洞试验证明了利用沙子重力模拟复杂曲面风压 的可行性,同时验证了本文提出的适用于复杂曲面天 线的形变测试方案的可行性。通过模拟试验和风洞试 验证明被测天线的刚强度满足在35 m/s风速条件下 正常服役、在55 m/s风速条件下不遭破坏的设计要求, 且在两种工况下天线变形均位于弹性变形范围内,无 残余变形。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨仲. 反射面天线热变形对其方向图的影响[J]. 电子机 械工程, 2015, 31(5): 19-22.
- [2] 康永, 王振霖, 崔志武, 等. 碳纤维蜂窝夹层天线热-结构 耦合变形仿真分析[J]. 真空与低温, 2019, 25(4): 249-253.
- [3] 张正尧, 江世臣, 王萌, 等. 星载天线反射面型面热变形影 响因素分析[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(2): 130–137.

- [4] 王豆, 邵晓东, 刘思濛. 一种大型反射面天线面板装配
  变形仿真方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(11):
  2542-2550.
- [5] 梅庚君, 项斌斌, 王娜, 等. 主反射面变形引起的天线指向 误差修正方法[J]. 天文学报, 2020, 61(6): 27-38.
- [6] 彭灿, 彭超. 某复合材料星载天线反射面抗力学环境设计 与验证[J]. 机械与电子, 2018, 36(8): 12-16.
- [7] 张李军, 王晨, 顾叶青, 等. 某车载天线阵面结构设计与仿 真分析[J]. 电子机械工程, 2021, 37(2): 9-12.
- [8] 边飞, 孙为民. 某雷达风载下抗倾覆疲劳研究 [J]. 电子机 械工程, 2020, 36(3): 26-29.
- [9] 夏鹏. 抛物面天线主反射面参数化建模与热变形分析[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
- [10] NIE R, HE B Y, YAN S Z, et al. Optimization design method for mesh reflector antennas considering the truss deformation and thermal effects [J]. Engineering Structures, 2020, 208: 47.
- [11] YANG Y, TAN L, JING M, et al. Effects of localized deformation induced by reflector antenna on received power[J]. Optics Communications, 2009, 282(3): 396–400.
- [12] LI T J, SHI J C, TANG Y Q. Influence of surface error on electromagnetic performance of reflectors based on Zernike polynomials[J]. Acta Astronautica, 2018, 145: 396–407.
- [13] 糜敏, 王超. 舰载天线罩刚强度性能试验分析方法 [J]. 电子机械工程, 2020, 36(5): 32-34, 45.

**李建伟** 男,1973年生,高级工程师,主要从事雷 达复合材料天线的设计与制造工作。

秦强强 男,1993年生,硕士,主要从事电子装备 精确建模与可靠性评估工作。

*چ*ددددددددددددددددددددددددددددد

# 声明

为适应我国信息化建设,扩大本刊以 及作者的知识信息交流渠道,本刊已被封 面上的数据库全文收录,其作者文章著作 权使用费与本刊稿酬一次性付给。如作者 不同意文章被收录,请在来稿时向本刊申 明,本刊将作适当处理。