

大型张拉膜天线罩结构计算和实验验证

徐晓晨, 戴苏亚, 顾叶青

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 对负高斯曲面张拉膜天线罩结构刚强度进行仿真计算和实验验证。首先采用小弹性模量法进行找形分析, 然后参考建筑结构荷载规范施加风载荷进行几何非线性分析计算, 并根据膜结构技术规程进行刚强度校核, 最后进行实物样机力学实验验证。将仿真计算结果和实验结果对比发现, 加载后膜面应力最大误差为 8.4%, 膜面变形最大误差为 5.1%, 均在工程允许范围内, 表明仿真计算方法的合理性。

关键词: 负高斯曲面; 张拉膜; 天线罩; 找形分析; 复合材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-8000(2020)07-0114-04

随着雷达技术的进步, 现代雷达设备向高频、宽频、超大尺寸规模方向发展, 传统玻璃钢夹层天线罩从电讯、结构角度均不能满足要求, 急需研制一种适用于高频、宽频、超大尺寸规模要求的新型天线罩。

传统的高性能玻璃钢夹层天线罩采用热压罐固化成型, 由于热压罐设备尺寸规模限制, 玻璃钢夹层天线罩尺寸存在上限, 不能满足某些大型相控阵雷达要求。因此国外大尺寸天线罩放弃玻璃钢夹层形式而采用张拉膜形式, 美国霍华德-洛伦兹号导弹测量船“朱迪眼镜蛇”改进型双频段雷达系统, S 波段和 X 波段两个天线均采用张拉膜天线罩, 如图 1 所示, 天线罩工作透波区域为一张完整膜材, 除了膜材外没有任何其他遮挡, 膜材采用圣戈班天线罩专用膜材 R60, 经纬向强度大于 11000 N/5 cm。

1 工程问题描述

张拉膜天线罩以负高斯曲面^[1]为基础, 主体部分由金属框架和高强膜材构成, 膜材的经向纤维和纬向纤维分别向天线罩内外弯曲起拱, 经纬向正负曲率之和为零, 天线罩整体形状呈现为双曲马鞍形。负高斯曲面天线罩具有清晰的传力路径, 风压载荷由向内起拱的膜材径向纤维承受, 风吸载荷由向外起拱的膜材纬向纤维承受。施加预张力对膜面形状影响很小, 但对整体刚度提升很大。

本次研究的天线罩尺寸为 12.5 m×9 m, 拱高为 1 m, 极限风速为 60 m/s, 要求极限载荷下张拉膜天线罩满足刚强度设计要求。

膜材采用天线罩专用 PTFE 膜材, 基材为玻璃纤维, 属于 G 类膜材, 性能参数见表 1。

表 1 膜材性能参数

Table 1 Parameter of membrane

模量/MPa	泊松比	厚度/mm	经向强度/MPa	纬向强度/MPa
1600	0.1	1.12	180	170

2 初始形态分析

初始形态分析是确定在满足初始应力分布的受力平衡状态下的膜面几何形状。根据 CECS 158: 2015《膜结构技术规程》^[2], 对于 G 类膜材, 预张力选取范围为 2 kN/m~6 kN/m, 由于本天线罩尺寸大, 为提高刚度, 预张力选取上限为 6 kN/m。

利用 ABAQUS 有限元软件进行建模, 采用四边形网格对天线罩结构进行离散, 单元类型选择薄膜



图 1 “洛伦兹”号测量船天线罩

Fig. 1 Radome of “Cobro Judy” surveillance vessel

张拉膜天线罩在高频、宽频性能表现也远好于玻璃钢夹层天线罩。目前国内尚无张拉膜天线罩的工程应用案例, 因此张拉膜天线罩研究具有重要实用价值。

收稿日期: 2019-12-31

作者简介: 徐晓晨 (1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事天线罩结构设计和力学计算方面的研究, xinxiangxxch@sina.com。

单元,薄膜单元只能传递面内拉力,不承受面内其他力,如压力和剪力,也不承受弯矩,即薄膜单元只有面内拉伸刚度。

首先采用曲面方式抬高控制点到指定高度进行找形。找形方式为设指定控制点坐标为在两短边中点起弧 600 mm 的曲面矩形的基础上,再将两短边中点位移提升 400 mm 的抛物线形状,总计起拱 1000 mm。找形分析起始形态见图 2,最终形态见图 3。

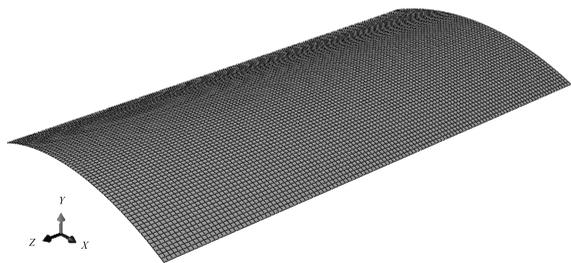


图 2 找形分析起始形态

Fig. 2 The original shape of form-finding

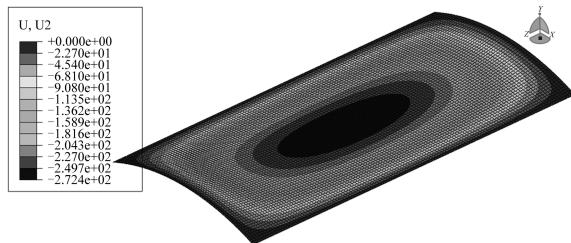


图 3 找形分析最终形态

Fig. 3 The final shape of form-finding

找形分析采用最小曲面约束条件的小弹性模量法,模量取实际模量的 2‰。采用降温的方式施加预应力,使找形结束后膜材应力达到 6 kN/m(对应膜面应力为 5.357 MPa)左右。找形结束后结构变形为双曲度的马鞍面形状,膜材中间部位凹陷 272 mm。

然后导出找形结束后的几何形态,将膜材弹性模量恢复至膜材实际弹性模量 1600 MPa,并通过降温施加膜面预张力 6 N/m(对应膜面应力为 5.357 MPa),即可得到初始态预应力云图,见图 4。可以看到,初始状态的膜面应力分布非常均匀,膜面最大应力为 5.372 MPa,最小应力为 5.330 MPa,大部分区域膜面应力为 5.357 MPa,符合《膜结构技术规程》对膜面预张力的要求。

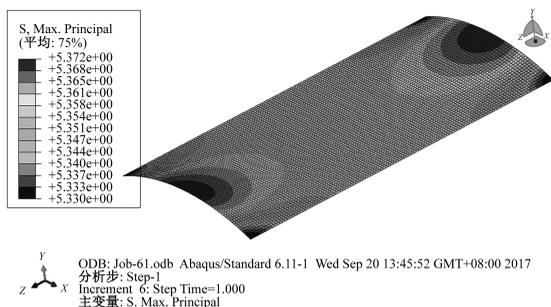


图 4 找形分析应力结果

Fig. 4 The stress after form-finding

3 载荷效应分析

根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[3],计算主要受力结构的风荷载标准值的公式如下:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

式中: w_k 为风荷载标准值; β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; w_0 为基本风压。

设计要求极限风速为 60 m/s,因此风振系数 β_z 取 1.0;由于天线罩曲率比较小,整体效果接近平面,体型系数 μ_s 取 1.2;高度变化系数 μ_z 按 A 类地貌,高度为 20 m,取指数公式 $\mu_z = 0.794Z^{0.24}$, μ_z 为 1.63;基本风压 $w_0 = \frac{1}{2}\rho V^2$,风速按照 60 m/s, w_0 取 2250 Pa。

综上所述,本项目对应的风荷载标准值 $w_k = 1.0 \times 1.2 \times 1.63 \times 2250 = 4401$ Pa。

4 设计许用值

根据 CECS 158:2015《膜结构技术规程》,在各种荷载组合作用下,膜面各点的最大主应力应满足下列要求:

$$\sigma_{\max} \leq f \quad (2)$$

$$f = \zeta \frac{f_k}{\gamma_R} \quad (3)$$

式中: σ_{\max} 为膜材的最大主应力; f 为主应力方向膜材抗拉强度许用值; f_k 为膜材抗拉强度标准值; ζ 为强度折减系数; γ_R 为膜材抗力分项系数。

膜材抗拉强度标准值 f_k 为 170 MPa;主要载荷风载为第二类载荷,因此膜抗力分项系数 γ_R 取 2.5;强度折减系数 ζ 对于一般部位取 1.0,对于节点和边缘部位取 0.75。因此边缘部位膜材抗拉强度许用值 $f = 0.75 \times \frac{170}{2.5} = 51$ MPa。

当膜结构的变形超过结构尺寸的2%时,剪切和疲劳的共同作用导致膜材局部破坏概率大幅度提高。因此需控制变形量不超过 $9000 \times 2\% = 180 \text{ mm}$ 。

5 仿真计算结果

在找形设计基础上施加风载荷进行几何非线性分析计算,张拉膜结构的应力云图如图5所示,膜面最大主应力 σ_{\max} 为 49.5 MPa,小于膜材的抗拉强度设计值 51 MPa。

根据《膜结构技术规程》要求,在第二类荷载效应组合下,膜面由于松弛而引起的褶皱面积不得大于膜面面积的10%,本次仿真膜面四个角局部出现松弛占比3%左右,属于可接受范围。

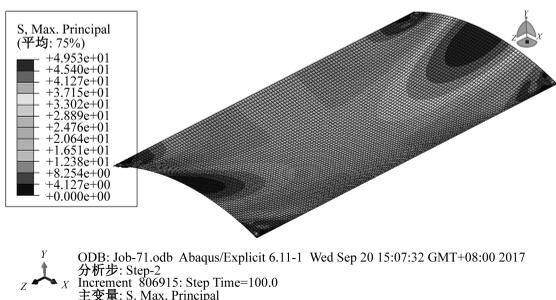


图5 膜面应力云图
Fig. 5 Stress of membrane

张拉膜结构的变形云图如图6所示,膜面的最大变形为 169 mm,小于结构需用变形量 180 mm。

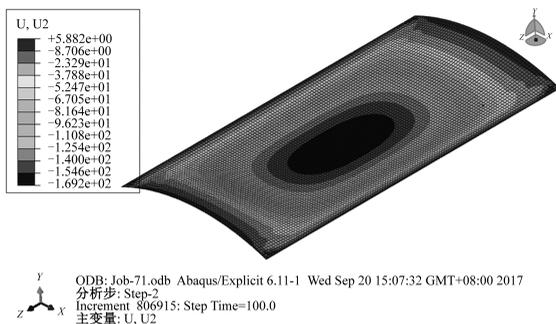


图6 膜面变形云图
Fig. 6 Displacement of membrane

通过仿真校核表明,张拉膜天线罩可以满足刚强度设计要求。

6 实验验证

制作全尺寸的张拉膜天线罩样机,采用气囊加载方式模拟风载荷的均布压强。采用激光位移传感器测量膜面初始形貌以及加载后的变形,此步骤需严格确保生产加工后膜面初始形貌与找形设计相一致。

膜面应力测量传统方法基于膜面向刚度原

理,由于本试验采用气囊加载,气囊对膜面向刚度影响极大,因此用测量法向刚度的方法无法得出膜面应力。

膜面应力与膜面振动的固有频率是一一对应的,除此之外,固有频率还与边界条件相关。本次试验针对性研发了一种基于频率的膜面应力测量装置,采用磁力将膜材通过两片圆形夹环对夹,圆环内部形成一个固定的边界,将加速度传感器放置在这个区域的中间,在传感器的旁边轻轻敲击,使膜振动,测出振动固有频率,通过比对试验标定,可以反推出膜面应力。

为了试验的可靠性,同时采用直接变形测量法测定膜面应变,反推出膜面应力,并与频率法互相比较,确保测试出的膜面应力真实可信。

表2汇总了不同位置膜面应力测试结果,并与有限元计算结果进行比对,最大误差为8.6%,在工程允许范围内。

表2 膜面应力测试结果
Table 2 Test result of membrane stress

X 坐标/m	Z 坐标/m	实测应力/MPa	仿真应力/MPa	误差/%
0	0	29.4	31.1	5.8
0	2.0	34.6	37.0	6.9
0	4.0	37.9	41.1	8.4
2.5	0	27.1	28.8	6.3
2.5	2.0	29.1	31.3	7.6
2.5	4.0	30.4	33.0	8.6

实验测得膜面最大变形为 178 mm,发生在结构正中心,与仿真对比,最大变形误差为 5.1%,在工程允许范围内。

7 结语

本文对张拉膜天线罩结构刚强度进行仿真计算和实验验证,为大型张拉膜天线罩在国内雷达行业的应用积累了宝贵经验。张拉膜天线罩在大尺寸、高频、宽频性能方面均优于传统玻璃钢夹层天线罩,符合新型相控阵雷达的发展需求,是一种很有前景的天线罩类型。

参考文献

- [1] Brain F, Marijke M, 杨庆山. 欧洲张力薄膜结构设计指南[M]. 北京:机械工业出版社,2016:11.
- [2] 中国钢结构协会空间结构分会,北京工业大学. 膜结构技术规程:CECS 158:2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015:16.
- [3] 中华建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:24.