

# 薄膜天线结构在真空中的模态测试方法\*

罗 婕, 邱 慧, 从 强, 许 哲, 尚 爱 华

(北京空间飞行器总体设计部 北京, 100094)

**摘要** 由于薄膜结构为轻质柔性结构, 空气对其模态分析结果具有不可忽略的影响, 因此在真空环境中开展模态试验是十分必要的。以平面薄膜天线结构为研究对象, 设计并搭建了一套适用于真空环境下的模态测试系统, 完成了多种工况下的模态测试, 并获得了有效测试数据。通过对数据进行处理和对比分析, 不仅验证了该测试系统的有效性和可行性, 而且还获得了空气对模态测试结果产生的具体影响, 得到了有用结论。该试验研究内容为薄膜天线的模态特性研究和设计改进奠定了坚实的技术基础, 具有十分重要的工程意义。

**关键词** 薄膜天线结构; 真空环境; 模态测试; 电磁铁激励器; 表面张紧力

**中图分类号** V414; TU399; TH751

## 引 言

随着深空探测、载人航天、天基观测等一系列重大航天工程的实施, 迫切需要研发大型天线结构以满足未来大功率、高精度卫星通信的需求。传统的空间大型可展开结构多采用较为成熟的桁架式结构形式, 随着结构尺寸的增大, 因其包含大量的关节铰链, 导致系统质量过大, 从而无法满足未来大型空间天线结构的应用需求。空间薄膜结构是近年来国际上出现的一种新型可展开结构, 它是由具有高综合性能的有机高分子化合物材料制成的大型轻量化结构, 在深空探测中可用于构建大型薄膜天线、太阳帆、遮光罩、太阳能集中器、充气防护盾及返回减速器等新概念飞行器。与桁架式可展开结构相比, 薄膜结构具有明显的低质量、大面积、高折展比等优势, 可实现在航天器上安装更大尺寸的可展开结构, 在未来空间探测中具有很好的应用前景<sup>[1-6]</sup>。

薄膜由于不具有抗弯刚度, 因此需要外框架提供张紧作用, 使薄膜产生一定的张紧力从而能承受一定的外荷载作用, 同时薄膜的厚度一般较小, 因此薄膜结构具有轻质、超低频率、密集模态、局部模态、几何大变形、高柔性、低密度、强非线性以及承载能力随张紧力改变等一系列特点, 其模态特性直接决定或很大程度上影响着结构的型面精度保持以及振动控制等方面, 因此通过开展地面试验来对薄膜结

构进行正确的模态分析是至关重要的<sup>[7-10]</sup>。目前关于薄膜结构的地面模态试验, 多数是在大气环境下开展的, 由于薄膜结构为轻质柔性结构, 空气对其模态分析结果具有不可忽略的影响, 它增加了质量并改变了结构的阻尼特性。为了更加准确地获得薄膜结构的模态特性, 在真空环境中开展模态试验是十分必要的。

笔者以平面薄膜天线结构为研究对象, 设计和搭建了一套适用于真空环境下的模态测试系统, 并设计了合理可行的试验方案, 获得了薄膜天线在真空环境下的模态频率和振型。通过将仿真计算结果、空气中的模态测试结果以及文中的测试结果进行对比, 不但验证了该测试系统的有效性和可行性, 而且还分析得到了空气对模态测试结果产生的具体影响。本研究内容为平面薄膜天线结构的特性摸索和设计改进提供了重要的基础数据和宝贵的工程经验, 为薄膜结构类产品在真空环境下的模态试验研究奠定了坚实的技术基础, 具有重要的工程意义和广泛的参考价值。

## 1 平面薄膜天线结构设计

平面薄膜天线结构一般需要采用外框架来提供薄膜的张紧力并对其进行固定, 同时外框架需要满足能够被视为刚性边界的条件, 即框架基频需要满

\* 国防基础科研计划资助项目

收稿日期: 2020-03-22; 修回日期: 2020-07-03

足 3 倍于薄膜基频的条件。根据以上要求,设计的平面薄膜天线结构如图 1 所示,该结构由外框架、薄膜天线、夹具、拉力传感器和调节螺栓组成。薄膜天线由专用夹具固定在外框架上,夹具和外框架之间装有调节螺栓和拉力传感器,通过调节螺栓可调节薄膜天线上不同的拉力,并通过拉力传感器,可以得到拉力值。通过以上调力方式,可将不同的表面张紧力导入到薄膜天线中,且表面张紧力与传感器拉力值之间的对应关系可通过数字散斑相关方法进行测量并获得。

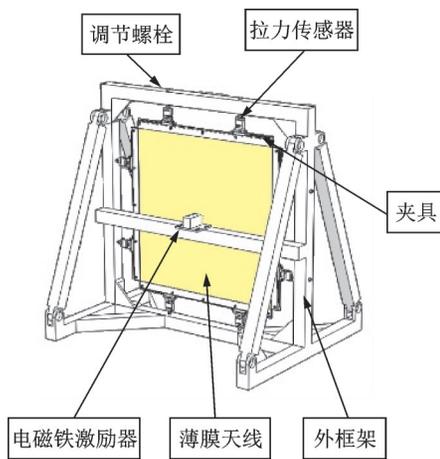


图 1 平面薄膜天线结构外形图

Fig.1 Outline of planar membrane antenna structure

## 2 模态测试系统设计

### 2.1 激励方法

试验采用初始位移法对薄膜天线进行激励,如图 1 所示,采用电磁铁激励器作为激励源,并将其固

定在薄膜天线一侧。电磁铁激励器在通电时,其内部的金属杆会伸出,为薄膜天线提供一定的初始位移,使其离开平衡位置;在断电时,金属杆会收回,此时薄膜天线在初始位移的激励下开始自由振动。该激励方法易于实现,设计灵活性较强,可根据所需要的激励力和初始位移大小对电磁铁激励器进行选型,并通过工装设计可以灵活变换电磁铁激励器的安装位置,从而实现对薄膜天线的有效激励,且不会产生附加质量,能准确获得模态测试结果。

### 2.2 测量方法

目前在非接触模态测量方法中,激光测振法和摄影测量法是比较适用于轻质柔性结构的模态分析测量技术。其中激光测振法发展较为成熟,相关硬件设备及软件算法的应用也比较广泛,而摄影测量法是一种相对较新且非常有潜力的非接触测量方法,不过由于影响其测试精度的因素较多,相关算法的发展还不够完善,因此一定程度上也限制了该方法的应用。

综合考虑测试对象、测试环境及测试精度等因素,笔者选用激光测振法对平面薄膜天线结构进行模态测量,采用的设备是 Polytec 激光测振系统及配套数据处理软件。

### 2.3 真空环境中的模态测试系统

图 2 为平面薄膜天线结构在真空环境中的模态测试系统示意图,它由平面薄膜天线结构、电磁铁激励器、直流稳压电源及控制电路、真空环境模拟器、扫描式激光测振仪、单点式激光测振仪、数据采集与分析系统、光学玻璃观察窗等组成。

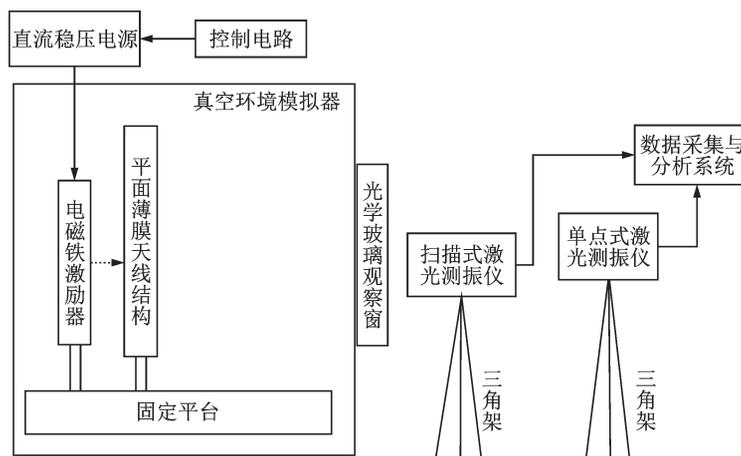


图 2 模态测试系统示意图(真空环境中)

Fig.2 Schematic diagram of modal testing system (in vacuum environment)

平面薄膜天线结构和电磁铁激励器通过专用工装固定在真空环境模拟器内,电磁铁激励器通过舱电缆与真空环境模拟器外的直流稳压电源相连接,且直流稳压电源由控制电路进行控制,为电磁铁激励器提供可调节的周期性阶跃脉冲信号,从而为薄膜天线提供初始位移激励并产生自由振动。

在真空环境模拟器外的两台三脚架上,分别固定了一台扫描式激光测振仪和一台单点式激光测振仪,两台激光测振仪同时发射出激光束,并穿过真空环境模拟器上的光学玻璃观察窗后,最终落到薄膜天线上。薄膜天线上粘贴有等间距阵列式的小面积漫反射纸,在进行模态测试时,扫描式激光测振仪的激光点将依次落在每一块漫反射纸上,并进行信号采集,同时单点式激光测振仪的激光点落在其中某一块漫反射纸上,并同步进行信号采集,该信号是模态分析时的参考信号。通过数据采集与分析系统对两台激光测振仪的返回信号进行采集和分析计算,得到薄膜天线的模态频率和振型,从而为产品模态特性分析和设计改进提供重要依据。

需要提及的是,在用激光测振仪对真空环境中的薄膜结构进行扫描测量时,国外学者曾采用了将激光测振仪安装在真空环境模拟器内的方式<sup>[11]</sup>,这种方式对设备安装空间提出了很高的要求,不适用于小型真空环境模拟器。同时,为了保护激光测振仪免受真空环境的影响,需要制作特殊的保护装置,并在装置内通以循环的空气流,从而对激光测振仪进行有效散热,防止设备损坏,这些都无疑增加了设备安装的复杂程度。因此,笔者采用了图2所示的测试方式,有效避免了上述问题:将两台激光测振仪均放置在真空环境模拟器外部,无需特殊的散热装置,安装简单方便,且真空环境模拟器上的光学玻璃观察窗不会使穿过的激光束产生畸变,从而有效保证了测试结果的精度。该方法的不足之处是激光测

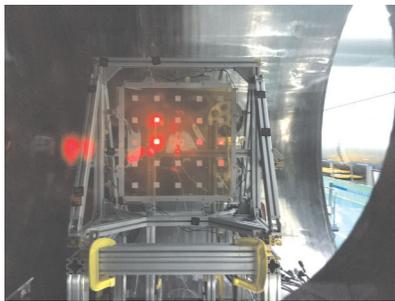


图3 平面薄膜天线结构安装在真空环境模拟器内  
Fig.3 Planar membrane antenna structure installed in vacuum environment simulator

振仪的扫描视场范围会受到一定的限制,因此需要选择合适大小的光学玻璃观察窗,使薄膜天线上的所有扫描点均处于激光测振仪的扫描视场范围内。图3和图4所示为平面薄膜天线结构和两台激光测振仪的实际安装状态。



图4 单点式激光测振仪和扫描式激光测振仪  
Fig.4 Single-point and scanning laser vibrometers

### 3 试验参数及工况

#### 3.1 薄膜天线特征参数

试验所用薄膜天线的各项特征参数值如表1所示,表中薄膜天线的尺寸是根据试验所用真空罐的大小来进行设计的,不能超过罐内的有效使用空间。由于薄膜天线尺寸的大小主要影响的是其基频的大小,因此测试结果所分析得到的规律同样适用于其它尺寸的薄膜天线,具有通用性。

在试验过程中,为了验证表面张紧力对测试结果的影响,将薄膜天线的表面张紧力分别调至4,8和12 N/m,并进行了模态测试。

表1 薄膜天线特征参数列表

Tab.1 List of characteristic parameters for membrane antenna

尺寸/mm	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	表面张 紧力/ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )
500×500×0.05	1420	3	0.34	4,8,12

#### 3.2 外框架基频值

在薄膜天线被激励并发生振动时,对于固定薄膜天线的外框架,为了使其不会与薄膜天线发生共振,需要保证外框架的基频大于薄膜天线基频的3倍。由于薄膜天线的基频与其表面张紧力相关,张

紧力越大,基频越高,在试验时选择的薄膜表面张紧力最大值为 12 N/m,通过仿真分析,可计算得到此时的薄膜天线基频为 24.5 Hz(真空环境中)。

对外框架的基频进行测试,如图 5 所示,得到框架的基频值为 82.3 Hz,满足大于薄膜天线基频 3 倍的条件,因此可将其视为刚性安装边界。

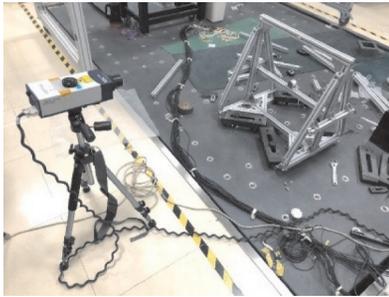


图 5 外框架基频测试

Fig.5 Basic frequency testing of outer frame

### 3.3 测试工况

表 2 所示为模态试验中完成的测试工况。

表 2 测试工况列表

Tab.2 List of testing conditions

工况	薄膜表面张紧力/(N·m <sup>-1</sup> )	初始激励位移/mm	试验环境
K1	4	2.5,5.0,7.5,10.0	真空
K2	8	2.5,5.0,7.5,10.0	真空
K3	12	2.5,5.0,7.5,10.0	真空
K4	4	5.0	大气
K5	8	5.0	大气
K6	12	5.0	大气

## 4 测试结果分析

### 4.1 真空环境中的一阶频率测试结果

表 2 中的工况 K1~K3 是在真空环境中完成的模态测试:薄膜表面张紧力分别取为 4, 8 和 12 N/m,且在每个张紧力下,分别取 4 个不同的初始激励位移值(2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mm)进行测试,测得的一阶频率值如表 3~表 5 所示。

由表 3~表 5 可以看到,当薄膜表面张紧力不变时,随着初始激励位移的增加,一阶频率值变化不大,这说明初始激励位移的变化基本不会影响一阶频率的测试结果。

分别对表 3~表 5 中的一阶频率取平均值,可得到真空环境下,薄膜天线在不同表面张紧力下的

表 3 表面张紧力为 4 N/m 的测试结果

Tab.3 Testing results with surface tension of 4 N/m

序号	表面张紧力/(N·m <sup>-1</sup> )	初始激励位移/mm	一阶频率/Hz
1	4	2.5	15.66
2	4	5.0	16.15
3	4	7.5	15.91
4	4	10.0	15.73

表 4 表面张紧力为 8 N/m 的测试结果

Tab.4 Testing results with surface tension of 8 N/m

序号	表面张紧力/(N·m <sup>-1</sup> )	初始激励位移/mm	一阶频率/Hz
1	8	2.5	19.57
2	8	5.0	19.24
3	8	7.5	19.45
4	8	10.0	19.53

表 5 表面张紧力为 12 N/m 的测试结果

Tab.5 Testing results with surface tension of 12 N/m

序号	表面张紧力/(N·m <sup>-1</sup> )	初始激励位移/mm	一阶频率/Hz
1	12	2.5	24.36
2	12	5.0	24.59
3	12	7.5	24.52
4	12	10.0	25.01

一阶频率测试结果,如表 6 所示。同时,表 6 还列出了薄膜天线在各个张紧力下的一阶频率仿真计算结果,以及与测试结果的误差百分比。

表 6 真空环境中的测试结果和仿真结果比较

Tab.6 Comparison of testing results and simulation results in vacuum environment

序号	表面张紧力/(N·m <sup>-1</sup> )	一阶频率/Hz (测试结果)	一阶频率/Hz (仿真计算结果)	误差/%
1	4	15.86	15.31	3.59
2	8	19.45	19.79	1.72
3	12	24.62	23.96	2.75

由表 6 可以看到,随着表面张紧力的增加,测试得到的一阶频率值不断增大,这和仿真计算结果的变化规律是一致的。另外,在不同的张紧力下,一阶频率的测试结果和仿真计算结果均比较接近,误差不超过 4%,这也充分验证了测试系统的有效性和可行性。

## 4.2 大气环境中的一阶频率测试结果

表 2 中的工况 K4~K6 是在大气环境下完成的模态测试:薄膜表面张紧力分别取为 4, 8 和 12 N/m, 由于初始激励位移值对一阶频率的测试结果影响不大, 因此这里只对位移值为 5 mm 的工况进行了测试, 测得的一阶模态频率值如表 7 所示, 同时表中还列出了真空环境下的测试结果, 并计算了两者之间的误差百分比。

表 7 大气环境和真空环境的测试结果比较

Tab.7 Comparison of testing results in atmospheric environment and vacuum environment

序号	表面张紧力/ (N·m <sup>-1</sup> )	一阶频率/ Hz (大气环境)	一阶频率/ Hz (真空环境)	误差/ %
1	4	7.63	15.86	51.89
2	8	9.21	19.45	52.65
3	12	11.60	24.62	52.88

由表 7 可以看到, 与真空环境中测得的一阶频率值相比, 薄膜天线在大气环境中测得的一阶频率值会大大降低, 降低幅度达到 50% 以上, 这充分说明了空气对于薄膜天线这类轻质柔性结构的模态测试结果有着不可忽略的影响。在对薄膜类结构进行地面试验时, 由于环境、设备、成本以及诸多其他因素的限制, 常常难以开展真空环境下的模态测试, 而表 7 的数据对比结果可以为两种环境下测试结果之间的关系提供一定的判定依据, 由空气中的一阶频率值可以初步推断真空中的一阶频率值大小。不过这个推断只是粗略的, 想要得到两种测试结果之间更加精确的关系, 还需要对不同尺寸的产品以及大量的试验数据进行分析 and 总结, 才能得到更加客观和科学的依据。

在对薄膜结构在大气环境中的模态测试进行理论分析和仿真建模时, 常常需要考虑如何对空气进行建模的问题, 通常情况下都是将空气作为附加质量项来考虑, 这种建模方式简单方便, 易于计算。这里将薄膜天线在大气环境中的一阶频率测试结果和仿真计算结果进行了对比, 如表 8 所示。可以看到, 薄膜天线在不同张紧力下的一阶频率测试结果与仿真结果的误差均在 16% 以上, 与表 6 中的误差值相比有较大的提高, 这说明在进行仿真计算时, 对空气的建模还不够准确, 除了将空气作为附加质量项外, 还应考虑到其他复杂因素的影响, 这也是在后续研究中需要进一步探索的内容。

表 8 大气环境中的测试结果和仿真结果比较

Tab.8 Comparison of testing results and simulation results in atmospheric environment

序号	表面张紧力/(N·m <sup>-1</sup> )	一阶频率/ Hz (测试结果)	一阶频率/ Hz (仿真计算结果)	误差/ %
1	4	7.63	9.72	21.50
2	8	9.21	11.09	16.95
3	12	11.60	13.91	16.61

## 4.3 两种环境中的模态测试频谱和模态振型

这里以表面张紧力为 4 N/m 的测试结果为例, 对模态测试频谱和模态振型进行分析, 其他表面张紧力下(8 和 12 N/m)得到的测试结果具有类似规律。由于篇幅限制, 这里不再给出相应的频谱曲线和模态振型图。

图 6 所示是平面薄膜天线结构在大气环境中的模态测试频谱(表面张紧力为 4 N/m), 可以清晰地看到此时激发出了一阶和二阶两种模态, 其模态振型如图 7 所示, 其中(a)图为一阶模态振型, (b)图为一阶和二阶模态振型。

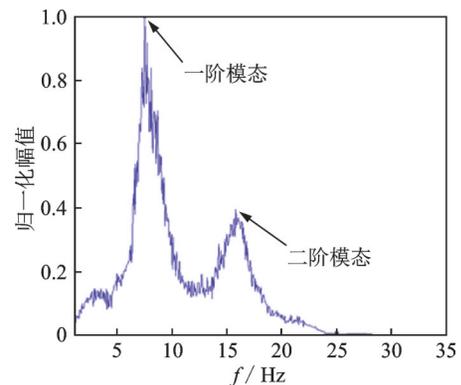
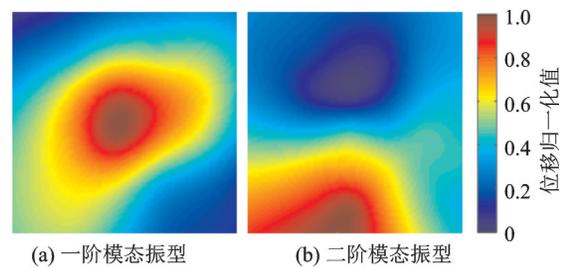


图 6 大气环境中的模态测试频谱

Fig.6 Modal testing spectrum in atmospheric environment



(a) 一阶模态振型 (b) 二阶模态振型  
(a) First-order mode shape (b) Second-order mode shape

图 7 大气环境中测得的一阶和二阶模态振型  
Fig.7 First-order and second-order mode shapes measured in atmospheric environment

图8所示是平面薄膜天线结构在真空环境中的模态测试频谱(表面张紧力为4 N/m),可以看到此时仅激发出了一阶模态,其振型如图9所示。

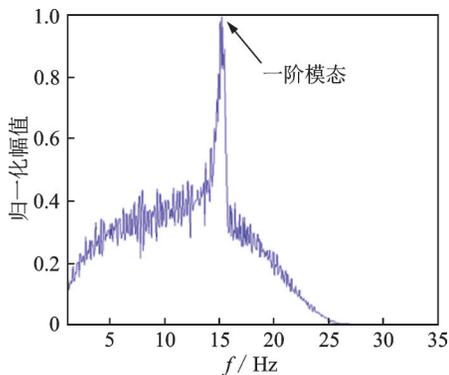


图8 真空环境中的模态测试频谱

Fig.8 Modal testing spectrum in vacuum environment

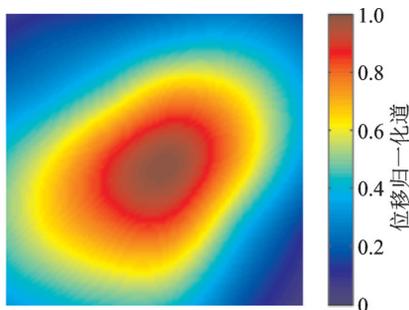


图9 真空环境中测得的一阶模态振型

Fig.9 First-order mode shape measured in vacuum environment

这里将一阶模态振型的仿真计算结果(不考虑空气影响)、真空环境中的测试结果以及大气环境中的测试结果进行对比(表面张紧力均为4 N/m),如图10所示,其中(a)图为仿真计算得到的振型,(b)图为真空环境下测得的振型,(c)图为大气环境中测得的振型。可以看到,真空环境中和大气环境中的模态振型是基本一致的,且与仿真计算结果比较接近。这说明空气虽然对一阶频率值的测试结果影响很大,但对一阶模态的振型影响并不大。

以上测试结果充分说明了该测试系统能够有效激励出薄膜天线的一阶模态,得到的测试结果与仿真计算结果一致性较好。对于高阶模态,由测试结果来看,真空环境中并未激励出高阶模态,而空气环境下也仅仅激励出了二阶模态,这主要取决于电磁铁激励器的安装位置以及数量:从振型仿真结果可以看到,一阶模态的最大振幅出现在薄膜天线的中心处,而这恰恰是本试验中电磁铁激励器的安装位置(见图1),因此被激励出的模态主要为一阶模态。

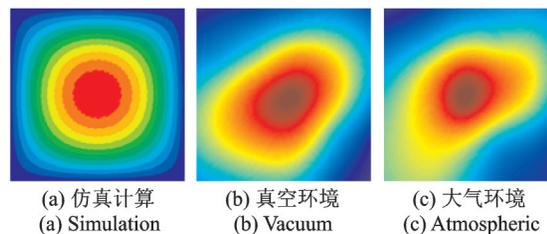


图10 一阶模态振型对比(仿真计算、真空环境及大气环境)  
Fig.10 Comparison of first-order mode shapes (simulation calculation, vacuum environment, atmospheric environment)

这正是该激励方式的灵活之处,研究者可以通过不同的工装设计来改变电磁铁激励器的安装位置(以模态振型仿真结果为依据),并根据需要增加电磁铁激励器的数量并进行选型,从而达到激励出所需模态的目的,方法易于实现,简单可控。

#### 4.4 总结

1) 该测试系统能够成功实现平面薄膜天线结构在真空环境下的模态测试,且能获得有效测试数据;

2) 将电磁铁激励器安装在薄膜天线中心位置附近,可以有效激励出薄膜天线的一阶模态,后续可根据高阶模态的振型仿真结果来确定电磁铁激励器的数量及安装位置,从而能够激励出高阶模态,并完成相关的测试结果分析和对比;

3) 薄膜天线在真空环境中的一阶模态频率测试结果与仿真结果吻合较好,误差不超过4%;

4) 对于薄膜天线的一阶模态频率值,大气环境下的测试值与真空环境中的测试值相比会大幅降低,降低幅度达到50%以上,这充分说明了空气对柔性结构的模态测试结果有不可忽略的影响;

5) 薄膜天线在大气环境中的一阶模态频率测试结果与仿真计算结果的误差在16%以上,这说明在进行仿真计算时,对空气的建模不够准确,不能只将其当作附加质量项考虑,还需考虑其他因素的影响,这将在后续研究内容中进行深入探索;

6) 薄膜天线在真空环境中和大气环境中的一阶模态振型非常相似,且接近于振型仿真计算结果,这说明空气虽然会大大影响一阶频率值的测试结果,但对振型的影响较小。

## 5 结束语

笔者以平面薄膜天线结构为研究对象,设计并搭建了一套适用于真空环境中的模态测试系统,完

成了薄膜天线在不同表面张紧力下的模态测试,并获得了有效测试数据。文中通过对各工况的数据进行分析,并和大气环境下的测试数据进行对比,总结得到了一些有用结论,同时该模态测试系统的有效性和可行性也得到了有力验证。本研究内容为平面薄膜天线结构的模态特性设计改进提供了重要的试验依据,并为真空环境下的模态测试系统设计奠定了坚实的技术基础,对同类产品的地面试验开展具有广泛的参考价值。后续将进一步开展平面薄膜天线结构的高阶模态特性研究,并深入探索空气对轻质柔性结构的影响,从而为薄膜类结构在航天器中的广泛应用打下坚实的技术基础。

### 参 考 文 献

- [1] BAO H, BRIAN S, STEVE W, et al. Commercialization of deployable space systems' roll-out solar array (ROSA) technology for space systems local (SSL) solar arrays [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China: IEEE, 2016.
- [2] 邱慧, 李潇, 樊俊峰, 等. 航天器平面薄膜结构模态分析和试验[J]. 航天器工程, 2017, 26(3): 43-49.  
QIU Hui, LI Xiao, FAN Junfeng, et al. Modal analysis and experiment of spacecraft flat membrane structures[J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(3): 43-49. (in Chinese)
- [3] DELL'ELCE L, KERSCHEN G. Probabilistic assessment of lifetime of low-earth-orbit spacecraft: uncertainty propagation and sensitivity analysis [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015 (38):900-912.
- [4] WONG W, PELLEGRINO S. Wrinkled membranes. part I: experiments; part II: analytical models; part III: numerical simulations[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2006, 1(1): 1-93.
- [5] 刘志全, 邱慧, 李潇, 等. 平面薄膜天线张拉系统优化设计及天线结构模态分析[J]. 宇航学报, 2017, 38(4): 344-351.  
LIU Zhiqian, QIU Hui, LI Xiao, et al. Optimal design of catenary system and model analysis for a planar membrane antenna structure [J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(4): 344-351. (in Chinese)
- [6] LESIEUTRE G A. How membrane loads influence the modal damping of flexural structures [J]. AIAA Journal, 2009, 47(7):1642-1646.
- [7] 陈宇峰, 陈务军, 邱振宇, 等. 空气对预应力薄膜结构模态的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(6): 1123-1127.  
CHEN Yufeng, CHEN Wujun, QIU Zhenyu, et al. Effects of air on modal behavior of pre-stressed membrane structure [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(6): 1123-1127. (in Chinese)
- [8] GONCALVES P B, SOARES R M, PAMPLONA D. Nonlinear vibrations of a radially stretched circular hyperelastic membrane [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 327(1/2):231-248.
- [9] FANG H, HUANG J, QUIJANO U, et al. Design and technologies development for an eight-meter inflatable reflectarray antenna [C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Newport, USA: AIAA, 2006.
- [10] ZHANG Y L, TOSHIKI H, ITSURO K, et al. Active vibration suppression of membrane structures and evaluation with a non-contact laser excitation vibration test [J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23(10):1681-1692.
- [11] TAKAHASHI T, KANDA T, IMAI S, et al. Development of modal test techniques for validation of a solar sail design [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2008, 43(3):542-548.



**第一作者简介:**罗婕,女,1981年2月生,博士、工程师。主要研究方向为航天器产品的振动、微振动和模态试验等。曾发表《卫星载荷隔振装置特性的微振动试验研究》(《振动、测试与诊断》2019年第39卷第3期)等论文。  
E-mail:luojie\_job@163.com