

# 大型柔性可展天线的频率优化和扰动响应预示\*

王朋朋<sup>1</sup>, 王小亮<sup>2</sup>

(1. 西安空间无线电技术研究所 西安, 710100) (2. 陕西省食品药品检验所 西安, 710065)

**摘要** 大型柔性可展开天线的高柔性、低阻尼特性给天线的稳定控制和卫星的姿态控制提出了严苛要求。结合某大型柔性可展开天线的研制,开展了大型柔性可展开天线的频率优化设计和扰动响应分析。对其中影响天线基频的两个重要因素——天线支撑结构刚度和扫描机构刚度进行了敏感性分析。在此基础上开展了天线模态频率仿真与试验,给出了天线在俯仰角度 $-10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 和方位角度 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 组合工况下绕转动坐标系惯量、基频与扫描角度的对应关系。完成了天线在平台扰动激励下的响应分析,给出了扰动激励对天线反射器型面误差和指向偏差的影响。仿真结果显示,通过频率优化设计后的大型柔性可展开天线对卫星扰动激励不敏感,可以满足设计要求。

**关键词** 天线结构; 自振频率; 模态; 扰动响应

**中图分类号** V474.2; TH113

## 1 问题的引出

为了适应卫星发射时整流罩的包络要求,大型天线一般采用可展开形式,在卫星发射时天线锁紧收纳在卫星平台上,入轨后天线展开至工作状态。该类型天线除了满足既定的任务要求以外,还需要具有收拢和展开的功能。由于大型可展开天线的口径大,其展开状态会对卫星产生严重的遮挡,同时如果距离卫星本体过近,还可能产生天线网面与卫星的钩挂干涉问题。因此,该类型天线一般都采用大型可展开反射器+展开臂的形式。在展开阶段,先通过展开臂的展开动作,将天线反射器展开至远离星体位置,再通过反射器的展开,最终到达预定的型面位置。

由于天线的展开动作,增大了天线绕转动坐标系的惯量,降低了天线的基频和天线抵抗外部扰动的能力。特别是对于大型高精度网状天线,微弱的扰动激励会导致天线反射器的型面恶化和指向偏差,严重影响信号传输和捕获跟踪性能。对于大型天线与星体的动力学解耦问题,目前主要存在 3 种普遍应用的方法。

1) 提高航天器附件的频率。在卫星平台确定的前提下,提高附件频率是避免结构耦合、降低附件响应最直接有效的方法,一般要求平台附件的频率

至少大于平台基频的 $\sqrt{2}$ 倍。提高附件频率的方法通常包括结构拓扑优化设计、更换比刚度高的材料、增加附件与平台连接刚度等<sup>[1-2]</sup>。

2) 减小卫星平台扰动激励源。卫星平台的扰动激励通常来自于回转部件的高速旋转、推进器的点火工作、可动部件的步进运动和太阳能帆板等大型柔性部件冷热交变引起的热颤振等。针对上述激励源,通常采取的措施包括对回转部件不平衡量的严格控制、减缓可动部件步进速度以及对柔性部件进行隔振等<sup>[3-7]</sup>。

3) 增加振动控制环节。振动控制分为被动控制、主动控制和主被动一体化控制等。被动控制一般是通过在结构上粘贴黏弹性阻尼层或引入阻尼元件,增加结构阻尼,从而降低结构的振动响应,具有结构简单、易于实现和可靠性高的优点。主动控制是在结构中大量采用智能材料,使结构变为智能结构,通过各种振动控制算法实施有效的控制策略,实现对结构振动的控制,其特点是有源控制、需要反馈回路、控制效果好及适应性强。主被动一体化控制结合了主动控制和被动控制的优点,通过主动部件和被动部件的联合优化设计保证在尽可能宽的频带内实现对结构振动的最大抑制<sup>[8-13]</sup>。

目前,由于增加振动控制环节会引入复杂的控制系统,降低系统可靠性,因此提高附件频率和减小平台扰动激励仍旧是工程应用最切实可行的方法。

\* 国家自然科学基金资助项目(U1537213)

收稿日期:2017-06-14;修回日期:2017-12-14

如图1所示,某大型柔性可展开天线主体由柔性网状反射器、高频箱和辅助支撑结构组成。其中,柔性网状反射器由天线肋、金属网反射面和张力索等组成。高频箱内安装有用于实现电气功能的电子设备,同时作为柔性反射器和辅助支撑结构的连接部件。为了提高天线展开状态的基频,辅助支撑结构采用可展开三角构型设计。

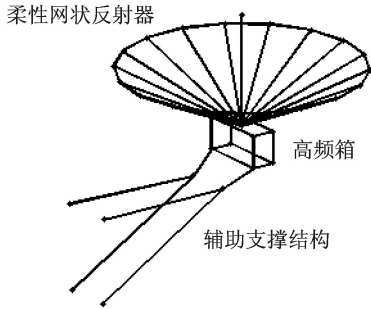


图1 某大型柔性可展开天线结构示意图

Fig. 1 Sketch of a large flexible deployed antenna

天线在轨工作时,需要在俯仰角度 $-10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 和方位角度 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内开展持续扫描运动。由于天线的高柔性及绕转动坐标系的大惯量,给天线和卫星的姿态控制提出了严苛要求,按照卫星平台控制提出的指标要求,天线在全工作模式下的结构基频应该大于1 Hz。笔者结合该大型柔性可展开天线,开展了大型柔性可展开天线的频率优化设计和扰动响应分析,对其中影响天线基频的两个重要因素(即天线支撑结构刚度和扫描机构刚度)进行了敏感性分析。在此基础上开展了天线模态频率仿真与试验,给出了天线在俯仰角度 $-10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 和方位角度 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 组合工况下,绕转动坐标系惯量、基频与扫描角度的对应关系。完成了天线在平台扰动激励下的响应分析,给出了扰动激励对天线反射器型面误差和指向偏差的影响。

## 2 天线基频敏感性分析

天线有限元仿真中,模态频率计算基于多自由度无阻尼系统的自由状态微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

其中: $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为结构整体质量矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{U}$ 为位移向量。

其对应的第 $k$ 阶模态频率和模态振型分别为 $\omega_k$ 和 $\Phi_k$ ,存在

$$(\mathbf{K} - \omega_k^2 \mathbf{M})\Phi_k = 0 \quad (2)$$

假设其中的设计变量为 $\mathbf{X}$ ,则

$$\left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{X}} - 2\omega_k \mathbf{M} \frac{\partial \omega_k}{\partial \mathbf{X}} - \omega_k^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{X}}\right)\Phi_k = 0 \quad (3)$$

由 $\Phi_k^T \mathbf{M} \Phi_k = \mathbf{I}$ ,可得第 $k$ 阶模态频率相对于设计变量 $\mathbf{X}$ 的敏感度系数为

$$\frac{\partial \omega_k}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\Phi_k^T}{2\omega_k} \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{X}} - \omega_k^2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{X}}\right)\Phi_k \quad (4)$$

### 2.1 天线支撑结构刚度

如图2所示,天线辅助支撑结构包含两段辅助支杆和3个展开铰链。其中:辅助支杆1通过展开铰链1与卫星舱板连接;辅助支杆2通过展开铰链2与天线展开部分连接;辅助支杆1和辅助支杆2之间为展开铰链3。相对于刚度较高的辅助支杆,展开铰链3的刚度对天线展开状态基频的影响最大。表1和图3分别为天线展开状态前6阶频率对

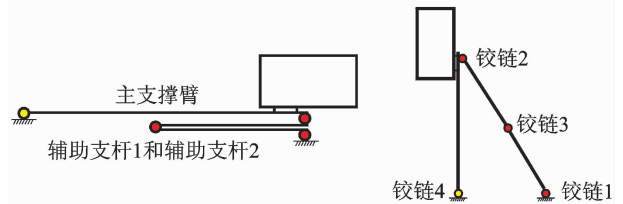


图2 辅助支撑杆与展开铰链相对连接关系示意图

Fig. 2 Sketch of support arms and joints

表1 天线展开状态前6阶频率对展开铰链3刚度的敏感性系数计算结果

Tab. 1 Sensitivity coefficients of the first six modal frequencies to stiffness of joint 3

刚度系数	模态频率					
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$
$k_1$	$1.72 \times 10^{-7}$	$1.40 \times 10^{-6}$	$9.73 \times 10^{-6}$	$2.61 \times 10^{-9}$	$5.21 \times 10^{-8}$	$5.69 \times 10^{-9}$
$k_2$	$1.26 \times 10^{-11}$	$1.05 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-12}$	$7.36 \times 10^{-12}$	$1.91 \times 10^{-12}$	$2.10 \times 10^{-10}$
$k_3$	$8.45 \times 10^{-10}$	$3.40 \times 10^{-12}$	$1.41 \times 10^{-11}$	$1.39 \times 10^{-10}$	$3.29 \times 10^{-9}$	$4.75 \times 10^{-11}$
$k_4$	$4.69 \times 10^{-10}$	$8.93 \times 10^{-13}$	$5.50 \times 10^{-12}$	$2.48 \times 10^{-12}$	$1.90 \times 10^{-11}$	$2.25 \times 10^{-12}$
$k_5$	$4.08 \times 10^{-11}$	$6.91 \times 10^{-15}$	$1.17 \times 10^{-13}$	$5.38 \times 10^{-11}$	$4.11 \times 10^{-9}$	$9.47 \times 10^{-12}$
$k_6$	$2.84 \times 10^{-7}$	$1.93 \times 10^{-6}$	$1.42 \times 10^{-5}$	$5.04 \times 10^{-9}$	$2.76 \times 10^{-7}$	$5.00 \times 10^{-8}$

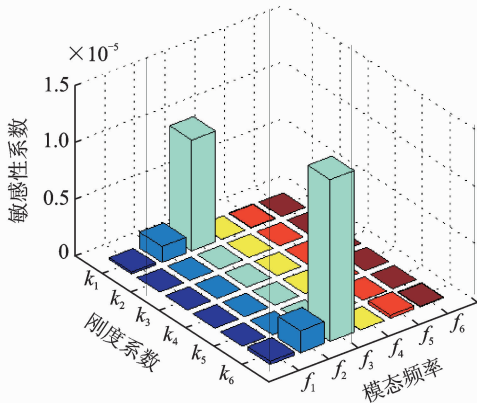


图 3 天线展开状态前 6 阶频率对展开铰链 3 刚度的敏感性系数柱状图

Fig. 3 Sensitivity coefficients bar graph of the first six modal frequencies to stiffness of joint 3

表 2 天线展开状态前 6 阶频率对扫描机构刚度的敏感性系数计算结果

Tab. 2 Sensitivity coefficients of the first six modal frequencies to stiffness of scanning mechanism

刚度系数	模态频率					
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$
$k_{11}$	$9.91 \times 10^{-12}$	$1.54 \times 10^{-7}$	$1.12 \times 10^{-8}$	$5.21 \times 10^{-8}$	$1.07 \times 10^{-8}$	$8.36 \times 10^{-6}$
$k_{12}$	$3.25 \times 10^{-10}$	$1.51 \times 10^{-9}$	$5.45 \times 10^{-6}$	$1.73 \times 10^{-7}$	$8.83 \times 10^{-9}$	$2.06 \times 10^{-8}$
$k_{13}$	$1.22 \times 10^{-7}$	$1.50 \times 10^{-12}$	$3.64 \times 10^{-9}$	$2.34 \times 10^{-7}$	$3.16 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-10}$
$k_{14}$	$1.71 \times 10^{-7}$	$2.99 \times 10^{-11}$	$1.79 \times 10^{-8}$	$1.97 \times 10^{-8}$	$5.47 \times 10^{-8}$	$4.66 \times 10^{-11}$
$k_{15}$	$5.68 \times 10^{-11}$	$1.44 \times 10^{-9}$	$3.57 \times 10^{-8}$	$1.49 \times 10^{-6}$	$1.87 \times 10^{-7}$	$2.23 \times 10^{-10}$
$k_{16}$	$1.81 \times 10^{-9}$	$7.74 \times 10^{-5}$	$6.47 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-6}$	$2.91 \times 10^{-8}$	$1.50 \times 10^{-5}$
$k_{21}$	$1.20 \times 10^{-7}$	$1.52 \times 10^{-12}$	$2.47 \times 10^{-9}$	$1.99 \times 10^{-7}$	$2.69 \times 10^{-6}$	$8.52 \times 10^{-11}$
$k_{22}$	$2.91 \times 10^{-10}$	$1.36 \times 10^{-9}$	$5.09 \times 10^{-6}$	$1.62 \times 10^{-7}$	$8.27 \times 10^{-9}$	$2.26 \times 10^{-8}$
$k_{23}$	$9.22 \times 10^{-12}$	$1.52 \times 10^{-7}$	$1.20 \times 10^{-8}$	$4.31 \times 10^{-8}$	$9.20 \times 10^{-9}$	$7.49 \times 10^{-6}$
$k_{24}$	$4.97 \times 10^{-13}$	$1.96 \times 10^{-7}$	$3.88 \times 10^{-9}$	$7.09 \times 10^{-10}$	$2.60 \times 10^{-10}$	$4.22 \times 10^{-8}$
$k_{25}$	$1.32 \times 10^{-9}$	$1.00 \times 10^{-11}$	$3.31 \times 10^{-8}$	$1.52 \times 10^{-6}$	$8.14 \times 10^{-8}$	$8.10 \times 10^{-8}$
$k_{26}$	$6.77 \times 10^{-5}$	$8.19 \times 10^{-10}$	$4.80 \times 10^{-6}$	$3.76 \times 10^{-6}$	$2.01 \times 10^{-5}$	$2.78 \times 10^{-8}$

展开铰链 3 刚度的敏感性系数计算结果和柱状图。由敏感性系数计算结果可知,对天线展开状态前 6 阶频率影响最大的刚度系数为  $k_1$  和  $k_6$ ,对应展开铰链 3 的轴向拉压刚度和绕轴扭转刚度。

### 2.2 扫描机构刚度

天线二维扫描机构包含俯仰控制和方位控制两部分,通过绕俯仰轴和方位轴的转动实现天线的扫描功能。由于天线的转动部分质量较大,作为天线转动部分和天线支撑结构的连接部分,二维扫描机构的刚度直接影响了天线展开状态的频率。表 2 和图 4 分别为天线展开状态前 6 阶频率对扫描机构刚度的敏感性系数计算结果和柱状图。由敏感性系数计算结果可知,天线展开状态 1 阶频率主要受方位

轴扭转刚度  $k_{26}$  影响,俯仰轴扭转刚度  $k_{16}$  主要决定了天线展开状态 2 阶频率。

### 3 天线基频仿真与试验

在天线展开状态基频敏感性分析、找出影响展开状态基频关键因素的基础上,经过对展开铰链 3 和扫描机构的刚度优化设计,进行天线展开状态的模态仿真计算。表 3 为仿真结果中  $x$  向、 $y$  向和  $z$  向基频对应的模态阶数、模态频率和模态有效质量分数, $x$  向、 $y$  向和  $z$  向 1 阶模态分别对应第 2 阶模态、第 1 阶模态和第 5 阶模态。图 5 为天线展开状态 3 个方向 1 阶模态振型图。其中: $x$  向 1 阶模态振型为天线绕俯仰轴扭转变形; $y$  向 1 阶模态振型为天线绕方位轴扭转变形,这与敏感性分析结果一致。

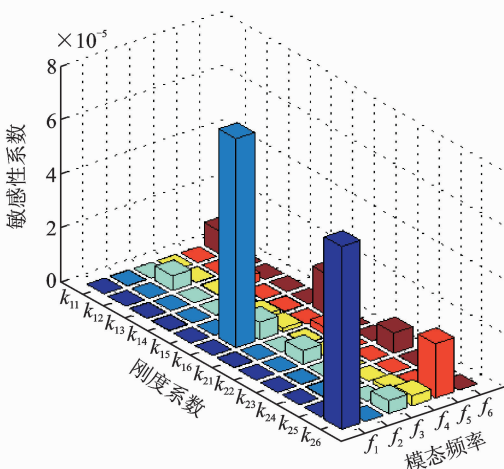


图 4 天线展开状态前 6 阶频率对扫描机构刚度的敏感性系数柱状图

Fig. 4 Sensitivity coefficients bar graph of the first six modal frequencies to stiffness of scanning mechanism

表3 天线展开状态模态仿真计算结果

Tab. 3 Modal simulation results of antenna in deployed status

阶数	模态频率/ Hz	模态有效质量分数/%					
		$T_x$	$T_y$	$T_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
1	1.04	0.00	34.00	0.07	78.37	0.07	41.48
2	1.13	32.53	0.00	0.33	0.00	10.35	0.00
5	5.61	1.86	0.75	64.39	0.09	74.53	0.77

### 3.1 天线惯量与扫描角度的关系

天线工作状态分别绕二维扫描机构俯仰轴和方

位轴转动,在进行扫描搜索和回扫等操作时,会产生一定的角加速度。由于天线转动部分惯量较大,进而会产生较大的扰动力矩,因此希望天线对转动坐标系的惯量始终控制在特定范围内,以减小二维指向机构转轴处的受力。图6,7分别为天线处于不同俯仰角度和方位角度时相对转动坐标系的质心坐标和惯性矩变化曲线。俯仰角度主要影响天线的质心 $x$ 坐标和 $z$ 坐标,方位角度主要影响天线的质心 $y$ 坐标,而天线相对转动坐标系的惯性矩主要取决于天线的俯仰角度。

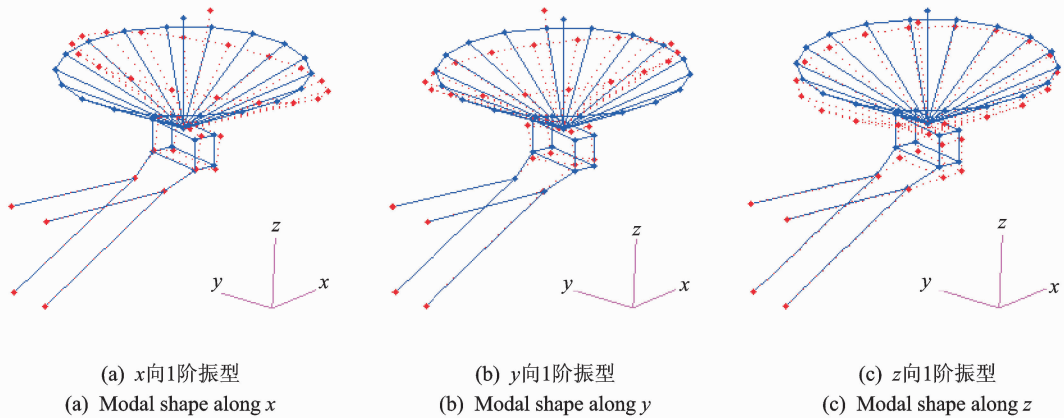


图5 天线3个方向模态振型图

Fig. 5 Modal shape of antenna in three directions

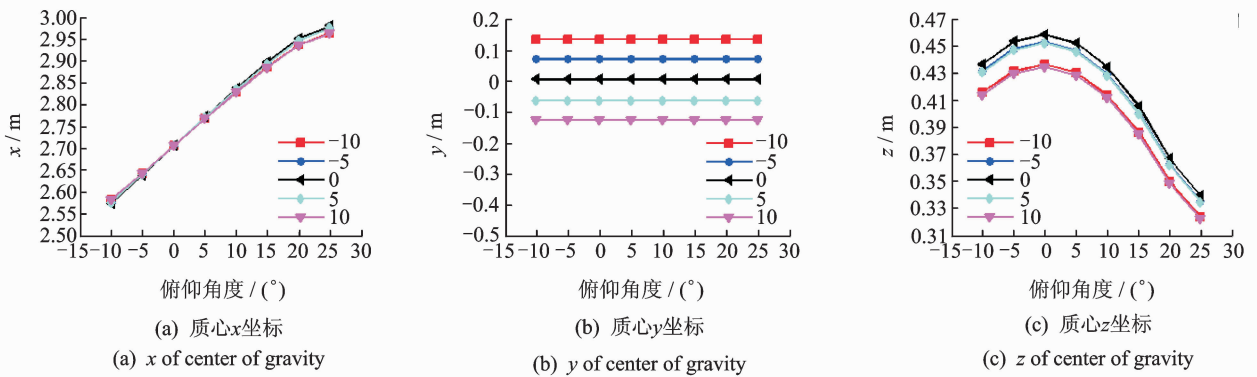


图6 不同扫描角度时的天线质心坐标

Fig. 6 Center of gravity of antenna at different scanning angles

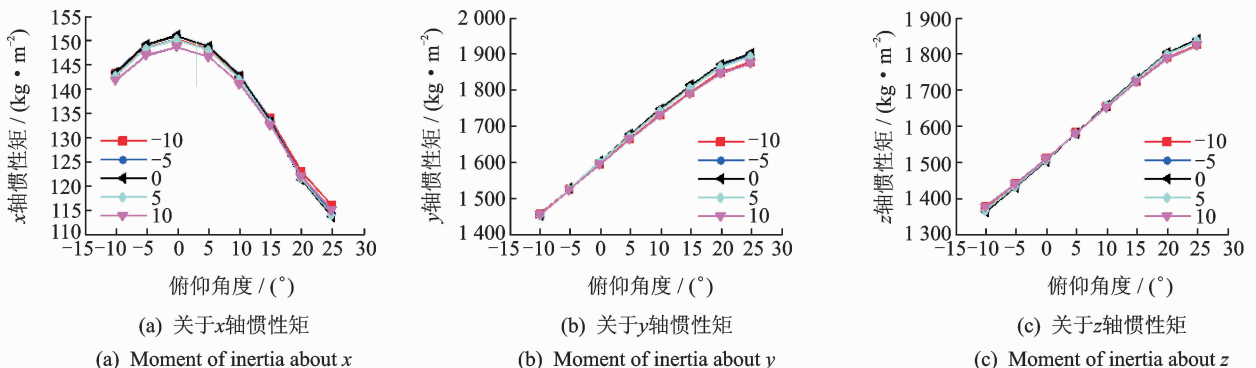


图7 不同扫描角度时的天线惯性矩

Fig. 7 Moment of inertia of the antenna at different scanning angles

### 3.2 天线基频与扫描角度的关系

图 8 为天线处于不同俯仰角度和方位角度时的  $x$  向基频、 $y$  向基频和  $z$  向基频变化曲线。相对于俯仰角度,方位角度对天线基频的影响更大,当天线方位角度为  $10^\circ$  时,不管俯仰角度如何变化,天线 3

阶基频均处于一个相对较高的水平。随着天线俯仰角度由  $-10^\circ$  增大到  $25^\circ$ ,天线的  $x$  向基频逐渐减小, $y$  向基频先减小后增大,而  $z$  向基频逐渐增大。在俯仰角度  $-10^\circ \sim 25^\circ$  和方位角度  $-10^\circ \sim 10^\circ$  的组合工况范围内,天线  $x$  向基频、 $y$  向基频和  $z$  向基频的最小值分别为 1.11,1.03 和 5.45 Hz。

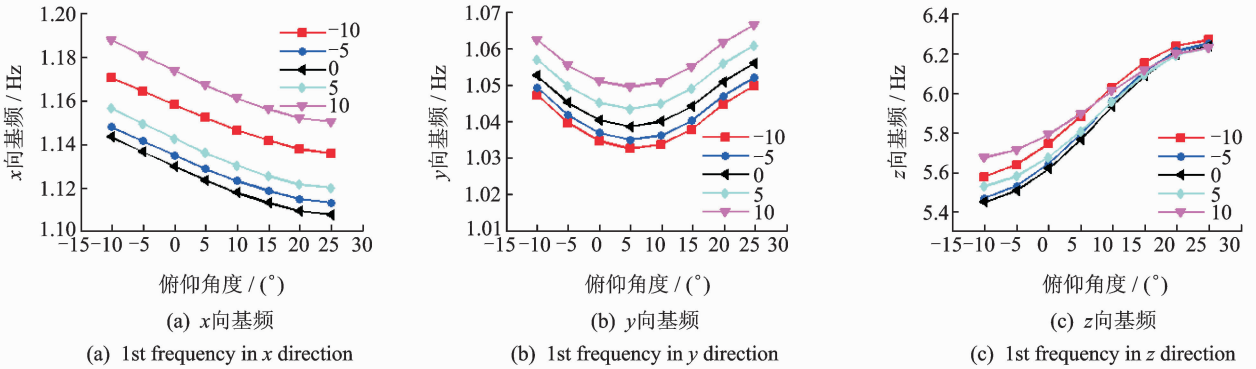


图 8 不同扫描角度时的天线基频

Fig. 8 1st modal frequencies of the antenna at different scanning angles

### 3.3 天线基频模态测试结果

天线的频率测定采用时域法,预先对天线施加一定的初始位移,然后释放,通过如图 9 所示的测量天线的时域衰减信号进行频谱分析,测定出天线的模态振型、模态频率和模态阻尼比。天线模态振型和对应的模态置信度矩阵图如图 10,11 所示。测试数据采集系统为 128 通道 LMS 公司 SCADAS-III 数

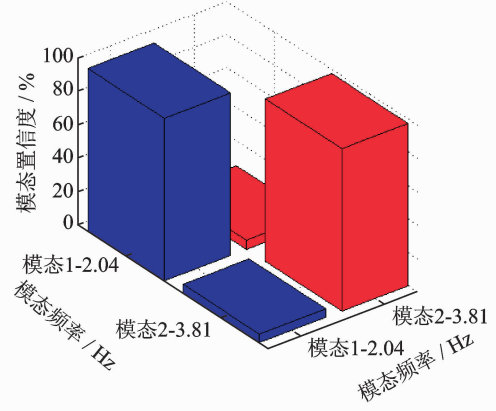
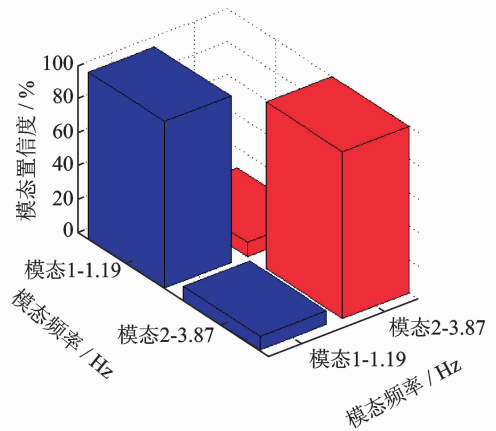


图 11 天线模态置信度矩阵图

Fig. 11 Modal assurance criterions of modal test results

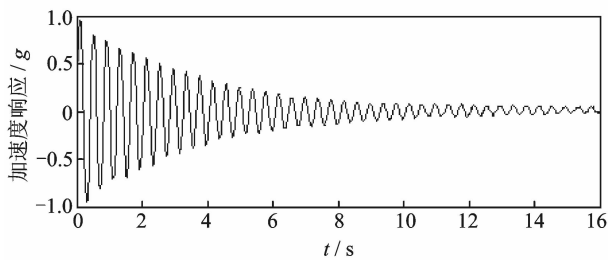


图 9 测点时域衰减信号

Fig. 9 Response curve in time domain

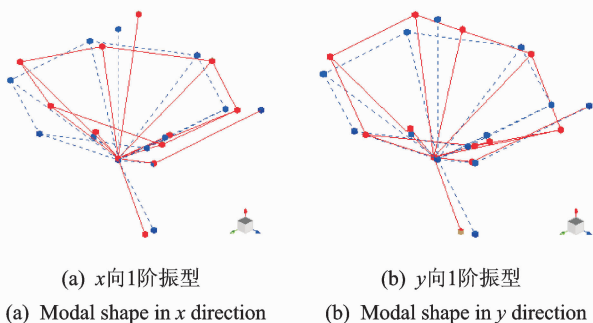


图 10 天线模态振型测试结果

Fig. 10 Test results of modal shapes

据采集前端,采集前段的频率响应范围为  $0 \sim 51.2$  kHz,具有非常好的低频特性,可以满足天线基频测试要求。传感器采用了 PCB 公司生产的三



轴向 ICP 型模态加速度传感器,频响范围 0.5 Hz~5 kHz,传感器质量约 7g,具有较好的低频测量能力,同时不会给结构引入较大的附加质量。表 4 为天线模态频率与模态阻尼比测试结果。

表 4 天线模态频率与模态阻尼比测试结果

Tab. 4 Test results of modal frequencies and modal damping ratio

模态阶数	x 向模态		y 向模态	
	模态频率/ Hz	模态阻尼 比/%	模态频率/ Hz	模态阻尼 比/%
1	1.19	3.57	2.04	5.27
2	3.87	0.76	3.81	1.95

由于零重力卸载装置的影响,y 向模态频率为天线与零重力卸载装置的系统频率。在进行模型修正时,考虑到附加刚度的影响,最终修正得出天线对应的 y 向模态频率为 1.04 Hz 和 3.45 Hz

### 4 扰动激励下的响应情况

天线在轨时会受到卫星的振动扰动干扰,卫星本体的振动来源主要是卫星姿态调整引起的干扰、反作用轮动不平衡和轴承偏心导致的干扰和太阳翼驱动机构以及推力器进行轨控调整引起的干扰等。由于天线的高柔性和低阻尼,振动扰动的引入会导致天线的长时间震荡响应,导致天线反射器型面恶化和指向偏差。图 12 为某典型姿态调整工况中,天线的前 10 阶模态位移曲线。其中,前三阶模态位移占主要权重,在经历 60 s 的衰减后,天线模态位移趋近于零。图 13 为天线反射器典型位置处(反射器内缘、反射器中部、反射器外缘)的位移响应曲线,反射器的最大位移响应峰值约 0.12 mm。图 14 和图 15 分别为天线反射器的型面均方根误差和指

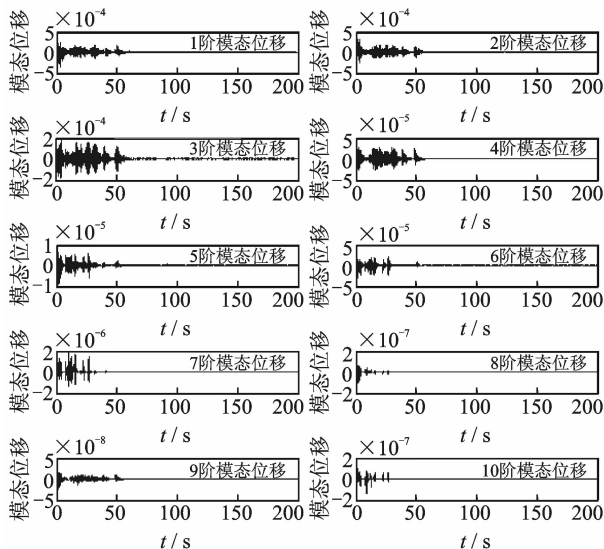


图 12 天线模态位移曲线

Fig. 12 Modal displacement curves

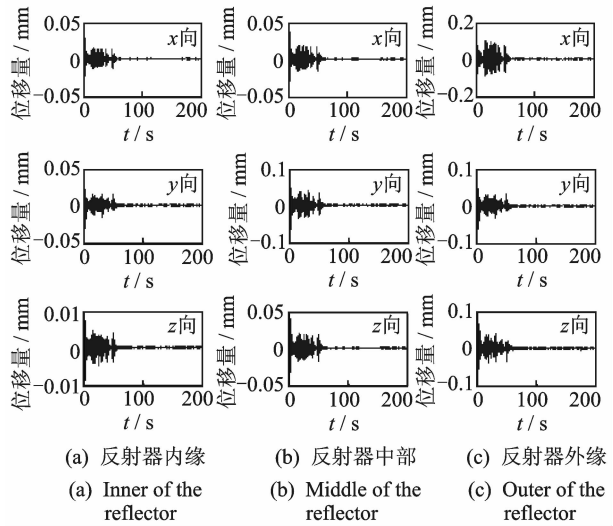


图 13 天线典型位置处的位移响应曲线

Fig. 13 Displacement response at typical locations

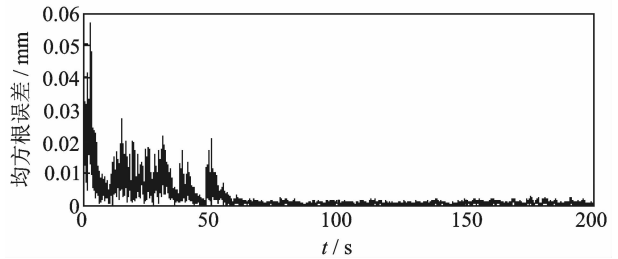


图 14 天线反射器型面均方根误差变化曲线

Fig. 14 Root mean square curve of antenna reflector

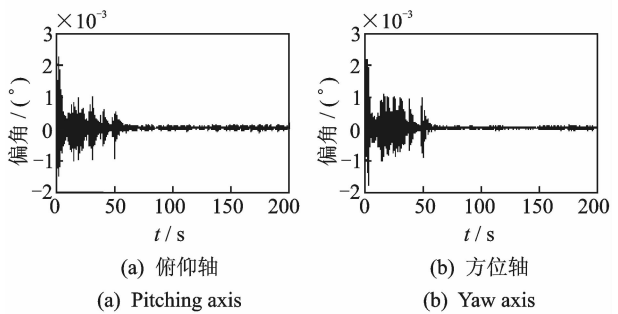


图 15 天线反射器指向偏角变化曲线

Fig. 15 Pointing error curve of antenna reflector

向偏角变化曲线。在姿态调整扰动激励下,天线反射器型面的均方根误差变化 0.06 mm,同时引起的俯仰偏角和方位偏角变化均为 0.002°。

### 5 结论

1) 通过天线基频敏感性分析,确定了对天线基频影响最大的参数为:天线支撑结构展开铰链 3 的轴向拉压刚度和绕轴扭转刚度、天线扫描机构俯仰轴扭转刚度和方位轴扭转刚度。

2) 通过提高天线的展开基频,可以减弱卫星扰动对天线的影 响,在某姿态调整扰动激励下,天线反射器型面的均方根误差变化 0.06 mm,俯仰偏角和方位偏角变化均为 0.002°。

## 参 考 文 献

- [1] 贾宏亮,姚琼,黄强. 基于质量分配的空间机械臂刚度优化[J]. 中国空间科学技术, 2008, 28(3): 45-52. Jia Hongliang, Yao Qiong, Huang Qiang. Stiffness optimization of space manipulator based on mass allocation [J]. Chinese Space Science and Technology, 2008, 28(3): 45-52. (in Chinese)
- [2] 李畅,何欣. 基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构设计 与优化[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2405-2409. Li Chang, He Xin. Design and optimization of trussed structure for space camera based on Rayleigh algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2405-2409. (in Chinese)
- [3] Lee D, Park G, Han J. Experimental study on on-orbit and launch environment vibration isolation performance of a vibration isolator using bellows and viscous fluid [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 45: 1-9.
- [4] Kamesh D, Pandiyar R, Ghosal A. Modeling, design and analysis of low frequency platform for attenuating micro-vibration in spacecraft [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(17): 3431-3450.
- [5] 谭天乐,朱春艳,朱东方,等. 航天器微振动测试、隔离、抑制技术综述[J]. 上海航天, 2014, 31(6): 36-45. Tan Tianle, Zhu Chunyan, Zhu Dongfang, et al. Overview of micro-vibration testing, isolation and suppression technology for spacecraft [J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31(6): 36-45. (in Chinese)
- [6] 曲亚楠,陆春玲,李潭,等. 高分辨率卫星微振动研究现状及发展前景展望[J]. 中国航天, 2014(8): 22-24. Qu Yanan, Lu Chunling, Li Tan, et al. Research status and development prospects of high resolution satellite micro-vibration [J]. Aerospace China, 2014(8): 22-24. (in Chinese)
- [7] 周伟敏,张子龙,施桂国,等. 帆板驱动微振动对卫星的影响与对策[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(2): 59-62. Zhou Weimin, Zhang Zilong, Shi Guiguo, et al. Analysis of micro-vibration of a solar array drive mechanism in a satellite and the countermeasure for suppressing the vibration [J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(2): 59-62. (in Chinese)
- [8] Fujii H, Sugimoto Y, Watanabe T, et al. Tethered actuator for vibration control of space structures [J]. Acta Astronautica, 2015, 117: 55-63.
- [9] Lane S, Lacy S, Babuska V, et al. Active vibration control of a deployable optical telescope [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(3): 568-586.
- [10] Sharma A, Kumar R, Vaish R, et al. Active vibration control of space antenna reflector over wide temperature range [J]. Composite Structures, 2015, 128: 291-304.
- [11] Sales T, Rade D, Souza L. Passive vibration control of flexible spacecraft using shunted piezoelectric transducers [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 29(1): 403-412.
- [12] 刘天雄,林益明,王明宇,等. 航天器振动控制技术进展[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 1-12. Liu Tianxiong, Lin Yiming, Wang Mingyu, et al. Review of the spacecraft vibration control technology [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 1-12. (in Chinese)
- [13] 牟全臣,黄文虎,郑钢铁,等. 航天结构主、被动一体化振动控制技术的研 究现状和进展[J]. 应用力学学报, 2001, 18(3): 1-7. Mou Quanchen, Huang Wenhui, Zheng Gangtie, et al. Research status and development progress of active and passive integrated vibration control technology in aerospace structure [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(3): 1-7. (in Chinese)



**第一作者简介:**王朋朋,男,1985年9月生,高级工程师。主要研究方向为航天器结构设计与仿真分析。曾发表《海洋二号卫星微波辐射计的动平衡设计仿真与试验》(《振动与冲击》2016年第35卷第9期)等论文。

E-mail: huohuojtu@163.com

