

## 次镜支撑结构硬涂层阻尼减振设计与仿真

王劲凯<sup>1</sup>, 孟立新<sup>1,2\*</sup>, 张立中<sup>1,2</sup>, 王佳男<sup>1</sup>, 张 瞰<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;  
2. 长春理工大学空地激光通信国防重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了提高大口径空间望远镜次镜支撑结构的动力学特性, 获得更好的成像质量, 在对比了目前减振方式优缺点的基础上, 提出了一种将阻尼硬涂层涂覆在次镜支撑薄壁梁上进行减振的方法。首先以硬涂层-次镜支撑复合结构综合性能最优为目标分析了硬涂层的最佳涂层厚度和弹性模量, 然后在此基础上用 ANSYS 分析了次镜支撑结构涂覆硬涂层前后的加速度响应曲线, 最后利用 Zemax 和 Matlab 等软件分别从镜片刚体位移和镜面面型变化两个角度分析了硬涂层减振对光学成像性能的影响。分析结果表明, 在一个 6 g 量级的正弦激励作用下, 涂覆硬涂层后次镜组件在 X、Y、Z 三个方向上的加速度响应较涂覆前均下降了 30%~50%, 光学系统成像质量和次镜面型精度也有很大提高。

**关键词:** 阻尼减振; 次镜支撑减振; 有限元分析; 硬涂层; 光学性能

**中图分类号:** TB535      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210344

## Design and simulation of hard coating damping vibration for secondary mirror support structure

Wang Jinkai<sup>1</sup>, Meng Lixin<sup>1,2\*</sup>, Zhang Lizhong<sup>1,2</sup>, Wang Jianan<sup>1</sup>, Zhang Tun<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Key Laboratory of Air-to-Ground Laser Communication and National Defense,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to improve the dynamic characteristics of the secondary mirror support structure of a large aperture space telescope and obtain better imaging quality, a method of damping vibration by coating a hard damping coating on the thin-walled beam of the secondary mirror support was proposed based on the comparison of the advantages and disadvantages of the current methods. Firstly, the optimal coating thickness and elastic modulus of the hard coating were analyzed with the objective of optimizing the comprehensive performance of the hard coating and secondary mirror support composite structure. Then, the acceleration response curve of the secondary mirror support structure before and after the hard coating was analyzed with ANSYS. Finally, the effects of the hard coating on the optical imaging performance were analyzed by using Zemax and Matlab software respectively from the rigid body displacement and the mirror surface profile change. The analysis results show that the acceleration response of the secondary mirror assembly in X, Y and Z directions decreases by 30% to 50% compared with that before coating under a sinusoidal excitation of 6 g magnitude, and the imaging quality and the precision of the secondary mirror model of the optical system are also greatly improved.

**Key words:** damping vibration; secondary mirror support vibration; finite element analysis;  
hard coating; optical performance

收稿日期: 2021-05-28; 修订日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划 (91438204)

作者简介: 王劲凯, 男, 硕士生, 主要研究方向为精密光机结构设计与减振、在线检测技术。

导师(通讯作者)简介: 孟立新, 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为空间激光通信、精密光机结构设计。

## 0 引言

随着空间遥感观测技术的不断发展和科研任务的需求,人们对空间望远镜的成像质量提出了更高的要求,这就使空间望远镜向着大口径、长焦距的方向发展<sup>[1]</sup>。对于这种精密光学仪器来说,需要有较高的刚度和稳定性,其中主镜支撑结构一般比较容易满足要求,薄弱环节往往在次镜支撑结构<sup>[2]</sup>。由于主次镜距离相对较远,再加上需要尽可能地减小光学系统遮拦比和质量,因此通常采用薄片梁结构连接主镜和次镜<sup>[3]</sup>。这种结构的好处是质量轻,对光学系统性能影响小,但柔性相对较大,为了提高结构刚度需要以增大光学系统遮拦比为代价增大梁片厚度或数量。所以次镜支撑结构动力学性能的好坏直接影响光学系统的成像质量,研究如何提高次镜支撑结构的动力学性能显得愈发重要。

针对次镜支撑结构常用的减振方式,如通过增大薄片梁的厚度和数量或采用偏置梁结构提高结构刚度、在薄片梁上粘贴粘弹性阻尼层、柔性结构减振等,应用在次镜支撑结构上都存在一些不足之处,如附加质量和体积较大,粘弹性阻尼材料不耐高温,增大了光学系统遮拦比等,导致应用后或是减振效果不佳,或是对结构本身性能造成较大影响。因此,针对次镜支撑结构需要一种切实有效、满足环境使用要求的新型阻尼减振措施。

硬涂层是由金属基或陶瓷基制成的涂层材料,主要应用于结构件的热障<sup>[4]</sup>、抗摩擦<sup>[5]</sup>、抗腐蚀<sup>[6]</sup>等。近年来的研究发现,硬涂层还具有阻尼减振效果,且特别适用于对一些薄壁结构进行减振。用作减振的硬涂层种类主要有 NiCrAlY 涂层、Mg 合金涂层、ZrO<sub>2</sub> 涂层、Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 涂层、FeCrMo 涂层、AlCuFeCr 等多种涂层,制备时通常采用等离子喷涂 (APS) 或物理气相沉积 (PVD) 将其涂覆在基体上。

硬涂层可以承受较高的工作温度,阻尼性能和力学性能受温度影响不大,而且其厚度小,附加质量轻,对大口径空间望远镜整体质量和光学系统遮拦比影响非常小。文中重点对硬涂层参数进行优化设计,并分析将其涂覆在次镜支撑薄壁梁后对系统光学性能的影响。

### 1 硬涂层减振机理与涂覆位置示意

一种空间望远镜结构示意图如图 1 所示。次镜组

件通过次镜支撑和主镜组件相连,次镜支撑为三翼对称结构,由三条长薄片梁构成,薄片梁一端连接次镜组件,另一端连接主镜组件。其中,主镜为旋转抛物面,次镜为旋转双曲面,主镜的焦点和焦轴与次镜完全重合。次镜和主镜间相对位置的变化会对空间望远镜的成像质量造成很大的影响,因此,次镜支撑结构的稳定性直接决定了光学系统能否获得稳定的光轴指向和较高的成像质量。

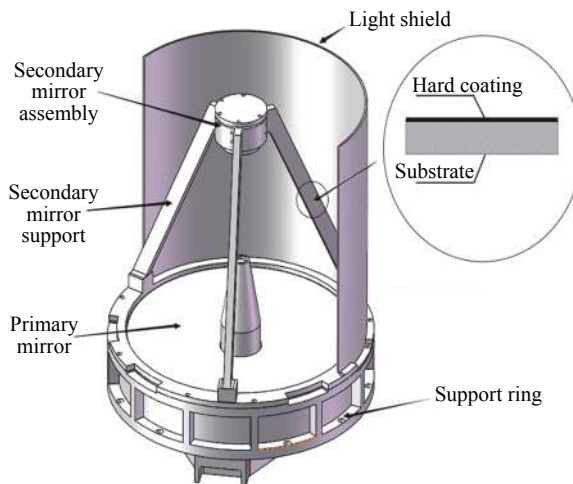


图 1 空间望远镜结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of space telescope structure

国内外大多数学者<sup>[7-8]</sup>认为硬涂层内部微观结构的摩擦耗能是其减振特性的来源。硬涂层颗粒嵌在由裂缝和孔隙组成的网格中,能够移动并相互滑过。也有学者<sup>[9]</sup>认为硬涂层的减振来源是由于涂层和基底力学性能的差异导致振动时在二者的接触面会出现不一致的变形域,会对时域产生影响从而增大应力应变的相位差角,相位差角越大,阻尼能力就越强;涂覆硬涂层后涂层和基底会产生新的接触面,产生的滑动摩擦会带来新的阻尼,也是硬涂层减振的主要来源;基底材料本身也存在固有阻尼,但大多数材料的固有阻尼一般都较小,可以忽略不计。

将硬涂层通过物理气相沉积或等离子喷涂的方式涂覆在次镜支撑的薄壁梁上,示意图如图 1 放大区域所示。硬涂层的力学特性和阻尼特性与其微观结构直接相关,而微观结构可以通过调整制备时的工艺参数来进行主动控制,进而得到具有不同性能的硬涂层材料。换言之,硬涂层的材料力学性能参数是可以进行主动设计的,这为使用硬涂层进行次镜支撑结构

的减振优化设计提供了基础。

## 2 硬涂层参数优化

在对次镜支撑进行硬涂层减振设计时,既要考虑阻尼能力,又要考虑刚度大小,使次镜支撑同时具备

$$E \cdot \tan \delta = \frac{E_c / (1 - H_c) [E_B \tan \delta_s \tan \delta_2 + H_B \tan \delta_c \tan \delta_1]}{\sqrt{(E_B^2 + H_B^2 + \frac{E_B H_B^2 (1 + \tan \delta_s \tan \delta_c)}{\tan \delta_1 \tan \delta_2}) (E_B \tan \delta_2 + H_B \tan \delta_1)}} \quad (1)$$

式中:  $E_B = E_c / E_s$ ;  $H_B = H_c / (1 - H_c)$ ;  $\tan \delta_1 = \sqrt{1 + \tan \delta_s^2}$ ;  $\tan \delta_2 = \sqrt{1 + \tan \delta_c^2}$ ;  $E_s$ 、 $E_c$  分别为基底和硬涂层的弹性模量;  $\tan \delta_s$ 、 $\tan \delta_c$  分别为基底和硬涂层的损耗因子;  $H_c$  为硬涂层厚度。由于轻量化、刚度和稳定性的要求,次镜支撑结构通常采用钢、碳纤维等比刚度高、线胀系数小的材料。以钢作为次镜支撑材料,  $MgO+Al_2O_3$  作为硬涂层材料进行研究,由于硬涂层材料的力学特性可以通过调整制备工艺参数来主动设计,将  $MgO+Al_2O_3$  涂层的弹性模量分别取为 30、40、50、60 GPa 探究其影响规律。

将材料属性代入公式 (1), 利用 Matlab 绘出硬涂层厚度  $H_c$  与复合结构损耗因子  $\tan \delta$ 、弹性模量  $E$  及二者乘积  $E \cdot \tan \delta$  的关系, 如图 2 所示。

由图 2(a)、(b) 可以看出, 随着涂层厚度的增加, 复合结构的损耗因子  $\tan \delta$  随之变大, 弹性模量  $E$  随之

抗振能力和抗变形能力才能更好地抑制主次镜相对位置的变化。因此考虑将代表复合结构刚度的弹性模量和代表阻尼能力的损耗因子的乘积  $E \cdot \tan \delta$  作为评价次镜支撑减振设计优劣的标准进行设计, 根据参考文献 [9] 可知, 二者的乘积可表达为:

下降, 且在涂层厚度相同的情况下, 涂层与基底的弹性模量差异越大, 次镜支撑-硬涂层复合结构的抗变形、减振能力越好。因此, 使用硬涂层对次镜支撑结构进行减振时, 在制备工艺允许的条件下, 应尽量调整硬涂层的弹性模量与钢等次镜支撑材料的弹性模量差异大些。

复合结构弹性模量与损耗因子乘积  $E \cdot \tan \delta$  与硬涂层厚度关系如图 2(c) 所示。二者乘积  $E \cdot \tan \delta$  随涂层厚度的增加先上升后下降, 且存在一个峰值点, 这个峰值点对应的涂层厚度就是使复合结构综合性能最优的厚度。因此, 在实际应用硬涂层对次镜支撑结构进行减振时, 涂层厚度应选取峰值点所对应的值, 这样才能使复合结构的减振能力和抗变形能力达到一个合理的平衡, 在实际应用中获得最佳的综合性能。

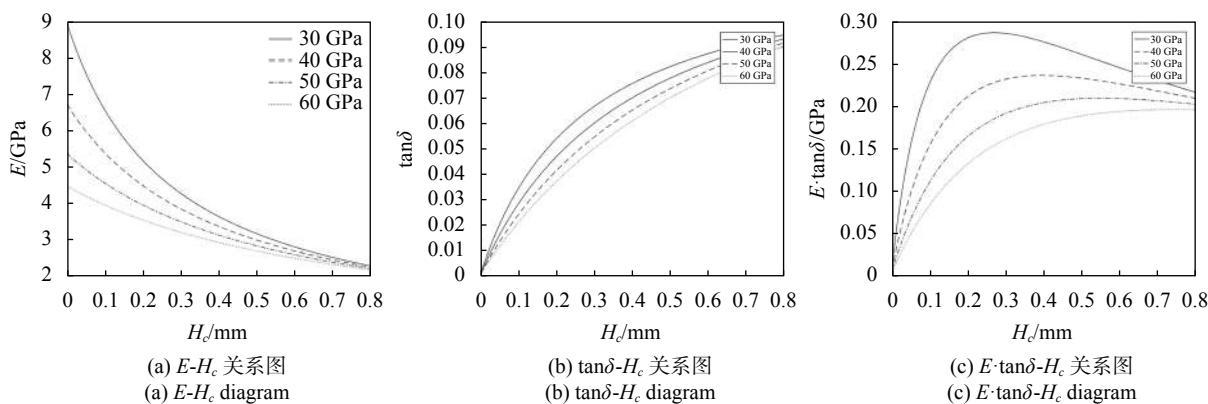


图 2 复合结构性能与涂层厚度关系

Fig.2 Relationship between properties of composite structure and coating thickness

## 3 硬涂层减振对光学系统影响分析

对次镜支撑结构减振的目的是抑制次镜相对于主镜的位置变化(即刚体位移)和镜片表面变形, 从而提高光学系统成像质量。其中次镜的刚体位移影响

光学系统的离焦、离轴、倾斜, 次镜的表面变形影响光学系统的像差。因此, 刚体位移和表面变形对光学系统的影响是不同的, 应该分别考虑硬涂层减振后对二者的影响。但 ANSYS 计算出的变形结果不能将次镜的刚体位移和表面变形分离开来, 因此在研究之前

需要对数据进行处理。

### 3.1 硬涂层减振后对次镜刚体位移的影响

次镜相对于主镜的刚体位移主要分为倾斜、离焦、离轴三种形式,如图 3 所示。

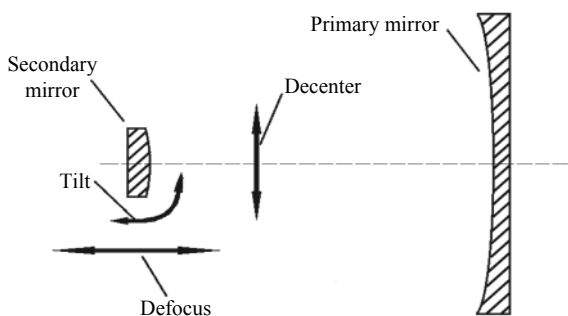


图 3 次镜相对主镜位置变化

Fig.3 Position of the secondary mirror relative to the primary mirror changes

由空间望远镜整体前三阶振型图可知,一阶振动时次镜相对于主镜位移为离轴,二、三阶振动次镜位移主要为倾斜和离轴,伴有少量离焦。不同形式的相对位置变化对成像质量影响不同,第二阶振动中三种相对位移全部存在,因此选择第二阶模态振型作为研究对象。

利用 ANSYS 计算出镜片各节点变形前后的坐标,导入到 Matlab 中,利用 Matlab 的数据处理功能将节点数据代入公式 (2),将得到的三个等式进行平方求和,再分别对  $e, f, g, \theta_x, \theta_y, \theta_z$  求偏导得到六个等式,分别令这六个等式等于 0,计算出的结果即为次镜的刚体位移,输入到 Zemax 镜头数据中就可以计算出光学性能的变化。

$$\begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & e \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & f \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $e, f, g, \theta_x, \theta_y, \theta_z$  分别为镜面沿  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴的平移和偏转;  $X_i, Y_i, Z_i, X'_i, Y'_i, Z'_i$  分别为 ANSYS 计算出的镜面变形前后的坐标。

### 3.2 硬涂层减振后对次镜表面变形的影响

在次镜支撑梁上涂覆硬涂层后不仅可以提高次镜的位置精度,还可以获得更好的面形精度。将 ANSYS 求解出的各点变形数据中的刚体位移去除后,代入直角坐标系下  $m$  项 Zernike 多项式:

$$\Delta Z_i = \sum_{i=1}^n k_i Z_i(x, y) \quad (3)$$

展开后得到:

$$\left. \begin{aligned} k_1 Z_1(x_1, y_1) + k_2 Z_2(x_1, y_1) + \dots + k_m Z_m(x_1, y_1) &= \Delta Z_1 \\ k_1 Z_1(x_2, y_2) + k_2 Z_2(x_2, y_2) + \dots + k_m Z_m(x_2, y_2) &= \Delta Z_2 \\ \dots & \dots \\ k_1 Z_1(x_n, y_n) + k_2 Z_2(x_n, y_n) + \dots + k_m Z_m(x_n, y_n) &= \Delta Z_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为表达方便,公式 (4) 可简记为:

$$Z \cdot K = \Delta Z \quad (5)$$

因为  $n > m$ , 即方程组的个数大于未知数的个数,为超定线性方程组,没有正解,只有最小二乘解,即满足  $\|ZK - \Delta Z\|^2 = \min$ , 利用 Householder 变换对系数矩阵  $Z$  进行正交三角化可以减小误差,得到较为精确的解<sup>[10]</sup>。求出 Zernike 多项式系数后便可根据 Zernike 多项式得到的拟合面后求出次镜的 PV 值和 RMS 值。

## 4 仿真分析

所研究的空间望远镜孔径为 250 mm, 主次镜间距为 200 mm, 次镜支撑梁厚度为 8 mm。由于硬涂层厚度较薄,分析时涂层部分选用壳体单元 shell181, 定义壳体厚度代替涂层厚度,双面各 200  $\mu\text{m}$ , 硬涂层  $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$  的弹性模量取 30 GPa。在硬涂层-次镜支撑系统中,由于壳单元与实体单元过渡处的节点自由度不同,不能单纯地使用 NUMMRG、CPINTF 等命令进行节点耦合,这样会使转动自由度不连续造成计算结果不准确。文中采用 MPC 方法 (SHSD 命令) 定义涂层和次镜支撑之间的装配关系,这种方法一般可理解为绑定接触形式。约束条件定义为底面固定约束,模拟次镜支撑安装在主镜组件上。采用四面体划分网格,单元大小设为 3 mm, 网格划分完成后共有 91097 个单元, 146669 个节点。

### 4.1 硬涂层单、双面涂覆减振效果对比

由于硬涂层的减振特性不仅来自涂层颗粒之间的摩擦,还有因基底和涂层弹性模量不同产生的局部应变域带来的阻尼、涂层和基底在交界面处的滑动摩擦带来的阻尼<sup>[9]</sup>,所以在相同涂层厚度下采用单面涂覆和双面涂覆的减振效果是不同的。

以单面涂覆涂层厚度 400  $\mu\text{m}$ 、双面涂覆涂层时每面厚度各 200  $\mu\text{m}$ 、涂层材料为  $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$  为例进行仿真分析。经仿真分析,涂覆硬涂层后两种方式获

得的一阶固有频率、一阶模态阻尼比、模态振型 Z 向 (平行于主次镜连线方向) 最大变形如表 1 所示。

表 1 单双面涂覆减振效果对比

Tab.1 Comparison of vibration damping effect of single and double-sided coating

Way	First natural frequency/Hz	First modal damping ratio	Z-direction maximum deformation of the first mode shape/mm
No coating	267.46	$7.000 \times 10^{-4}$	0.06074
One side	266.20	$8.954 \times 10^{-4}$	0.00043
Double sided	266.07	$9.386 \times 10^{-4}$	0.00021

从表 1 中可以看出,涂覆涂层后,单面和双面涂覆的次镜支撑结构的固有频率均小幅下降。根据运动学公式:

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (6)$$

式中:  $w_n$  为无阻尼系统固有频率;  $\xi$  为阻尼比;  $w_d$  为有

阻尼系统固有频率。涂覆硬涂层后模态阻尼比变大,根据公式 (6) 固有频率会小幅下降,与仿真分析结果固有频率下降 1 Hz 左右相符,说明了文中建立的仿真分析模型的正确性。由表 1 可以看出,采用双面涂覆涂层的方式,次镜支撑结构的一阶模态阻尼比大于采用单面涂覆的方式,Z 向最大变形也要比单面涂覆小一倍,说明采用双面涂覆方式减振效果更好,能更好地抑制主次镜间距的改变。因为在硬涂层厚度确定的情况下,采用双面涂覆的方式会扩大涂层与基底的接触面积,使局部应变域和滑动摩擦范围变大,所以对次镜支撑薄片梁进行双面涂覆比单纯地进行单面涂覆效果更好,双面涂覆会产生 1+1>2 的效果,因此在实际应用硬涂层对次镜支撑结构进行减振时应采用双面涂覆的方式。

#### 4.2 涂覆硬涂层前后受激励响应对比

对空间望远镜整体进行分析,获得前六阶模态振型如图 4 所示。

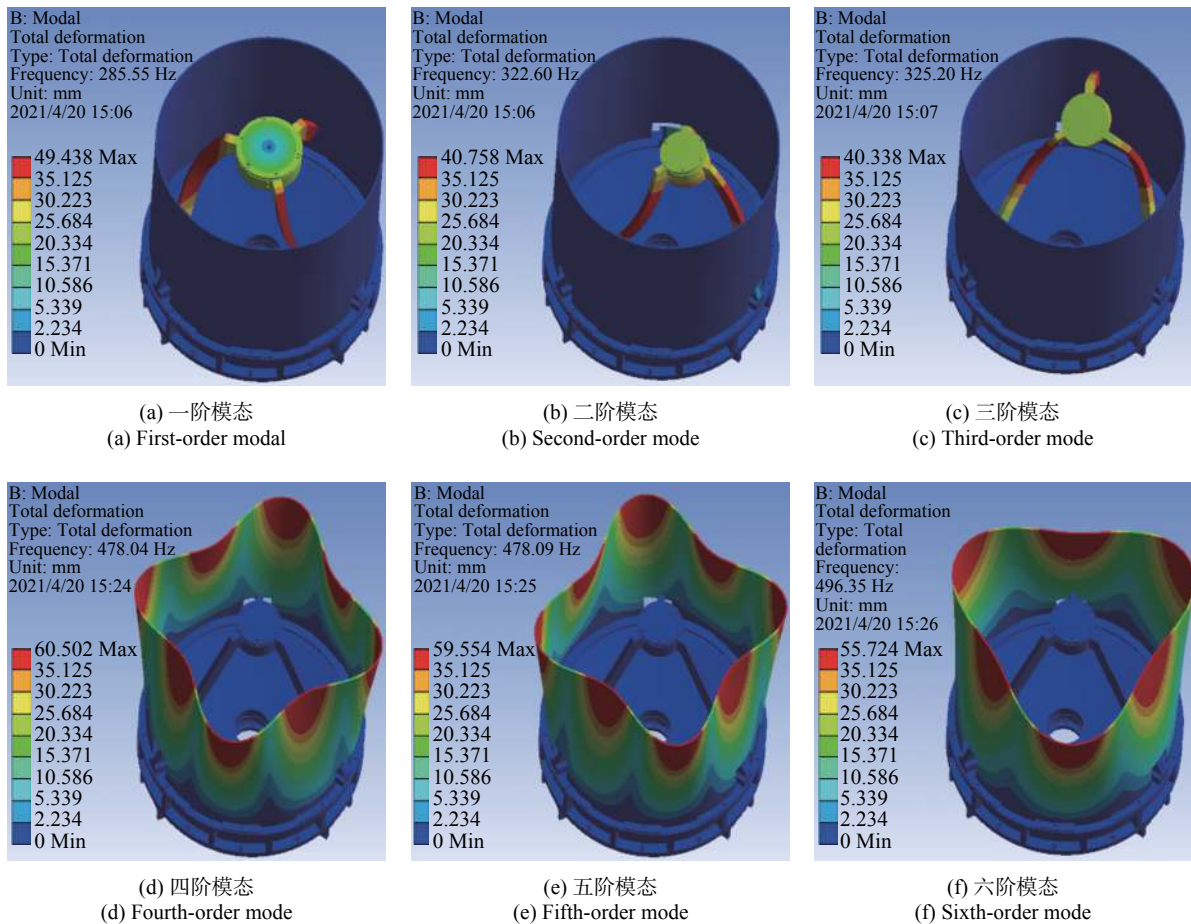


图 4 空间望远镜前六阶模态

Fig.4 The first six-order modes of the space telescope

从模态分析结果可以看出,空间望远镜前三阶模态为次镜支撑结构的变形,后三阶模态为遮光罩的变形。由于是对次镜支撑结构进行减振,只考虑前三阶模态。次镜支撑结构前三阶固有频率分别为 267、

309、312 Hz。

对次镜组件施加 6 g 量级的正弦激励,模拟次镜组件所处的发射环境。得到次镜边缘测点前三阶 X、Y、Z 三个方向上的加速度响应如图 5 所示。

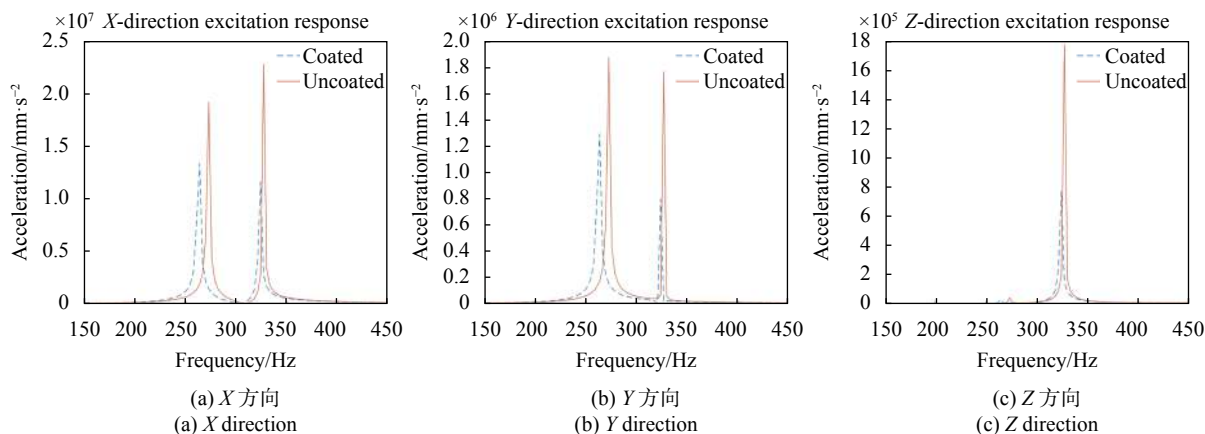


图 5 次镜在 X、Y、Z 三个方向上的加速度响应

Fig.5 Acceleration response of secondary mirror in X, Y and Z directions

可以看出,在受到激励后,相对于无涂层结构,有涂层结构的次镜在各个方向上的加速度响应明显降低,且二、三阶降低的比例尤为明显,三个方向的加速度响应均下降约 50%。说明涂覆硬涂层可以很好地

抑制次镜的激励响应,提高光学系统的成像质量。

### 4.3 硬涂层减振后对光学性能的影响

按照 3.1 节所述原理计算后得到涂覆硬涂层前后次镜的刚体位移如表 2 所示。

表 2 次镜刚体位移

Tab.2 Secondary mirror rigid body displacement

	Uncoated	Coated
X axis translation/mm	0.021 354 125	-0.008 571 06
Y axis translation/mm	0.007 947 025	-0.003 170 555
Z axis translation/mm	-0.000 003 885	0.000 001 621
X axis deflection/(°)	0.000 099 415	-0.000 039 655
Y axis deflection/(°)	-0.000 267 578	0.000 107 385
Z axis deflection/(°)	-0.000 000 201	0.000 000 022

从数值上看,涂覆硬涂层后,次镜各个方向上的刚体位移较涂层之前均有所下降。激励方向为 X 轴方向,因此 X 轴方向刚体位移最大,减振效果相对明显。最后把两组刚体位移输入到 Zemax 中进行光学系统成像质量的对比。

中程度,弥散斑越小越好,一般以 Arriy 斑作为参考,弥散斑在 Arriy 斑内比例越多,说明光学系统越理想。图 6、7 分别为使用快速傅里叶变换 (FFT) 计算得到的三种情况的调制传递函数和点列图。

MTF 调制传递函数和点列图是现代光学设计中最常用的评价方法。前者代表光学系统系统分辨能力,函数曲线越靠近衍射极限越好;后者代表光的集

从图 6、7 中可以看出,当不发生振动时,即主次镜相对位置不发生改变时,成像质量接近衍射极限,光学系统接近完美。发生振动时,没有涂覆硬涂层的光学系统 MTF 曲线严重偏离了衍射极限,弥散斑也

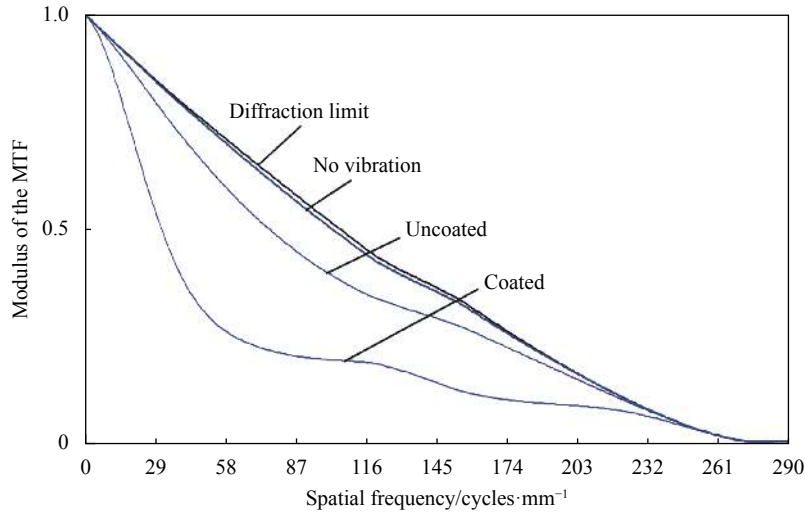


图 6 MTF 调制传递函数对比

Fig.6 Comparison of MTF modulation transfer function

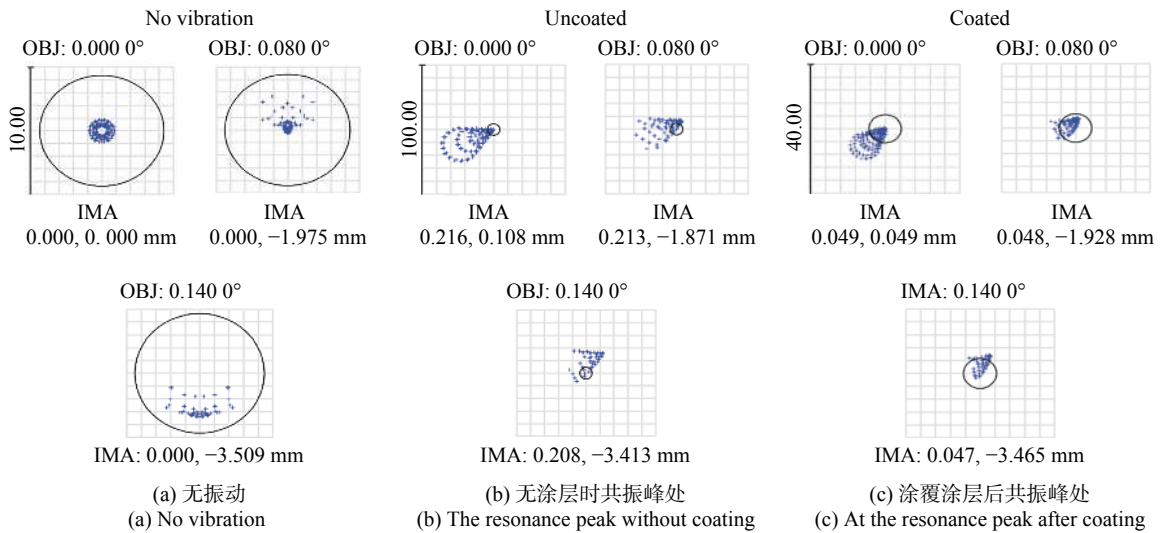


图 7 三种情况对应的光学系统点列图

Fig.7 Spot diagram of optical system corresponding to three cases

几乎全暴露在 Airy 斑范围之外,已经不能满足使用要求。而涂覆硬涂层减振后的光学系统 MTF 曲线偏离衍射极限的程度很小,三个视场的弥散斑大部分都在 Airy 斑之内,可见在对次镜支撑涂覆硬涂层减振后,光学系统的抗振能力得到很大提高。

#### 4.4 硬涂层减振后对次镜面型精度的影响

按照 3.2 节所述原理计算得到次镜在共振峰处的去刚体位移面形云图和表面变形最大值与最小值之差 PV、均方根值 RMS。其中,表面变形云图如图 8 所示。

无涂层时,共振峰处次镜表面变形的 PV 值为 4.465 nm, RMS 值为 0.891 nm;涂覆硬涂层后,共振峰处次镜表面变形的 PV 值为 1.571 nm, RMS 值为 0.253 nm。可以看出,由于次镜的口径不大,即使在涂覆硬涂层的情况下面型精度也能满足使用要求,但是涂覆硬涂层减振后可以使次镜的面型精度更加优异,当面对一些严酷的热环境、变轨调姿期间推力器点火工作、进出阴影冷热交变等恶劣的情况时也可以保证镜片的面型精度,使次镜能够承受更加恶劣的空间微振动环境<sup>[3]</sup>。

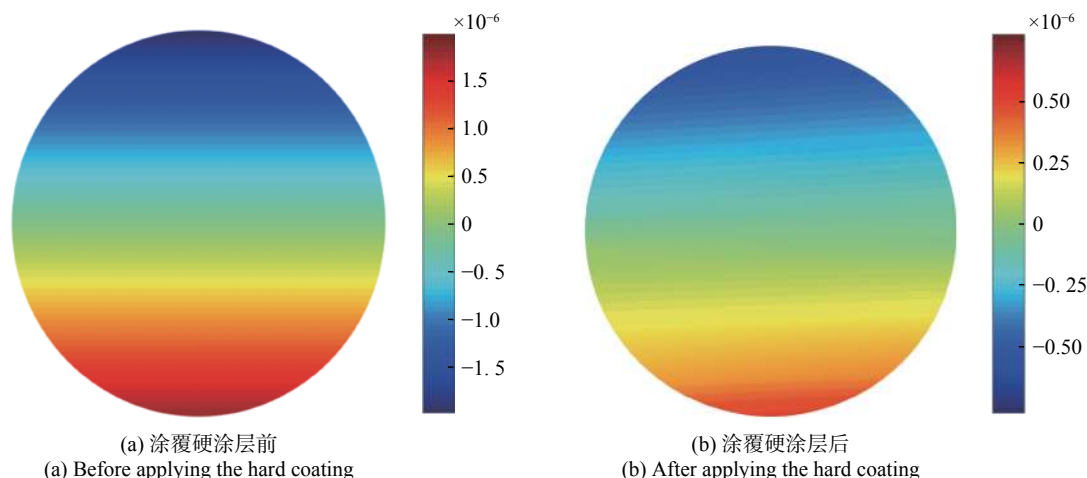


图 8 涂覆硬涂层前后共振峰处次镜面形云图

Fig.8 Sub specular cloud image of formant before and after applying hard coating

## 5 结 论

为了减小振动对主次镜相对位置变化产生的影响,确保大口径空间望远镜的成像质量,在对比了目前减振方式优缺点的基础上,提出了一种将硬涂层涂覆在次镜支撑薄壁梁上进行减振的方法,通过数值和仿真分析,得出以下结论:

(1) 当基底和硬涂层材料确定后,在涂层厚度相同的情况下,涂层与基底的弹性模量差异越大,次镜支撑-硬涂层复合结构的抗变形、减振能力越好;而且并不是硬涂层的厚度越厚越好,而是存在一个最优涂层厚度和弹性模量,使得复合结构的抗变形能力和抗振能力达到最优。

(2) 通过对建立的次镜支撑-硬涂层复合结构有限元模型进行的仿真分析可知,涂覆硬涂层后,复合结构的固有频率略微降低,阻尼比明显提高;在涂层厚度相同的情况下,与单面涂覆相比,采用双面涂覆的方式更能抑制次镜支撑在光轴方向的变形。

(3) 涂覆硬涂层后次镜在各个方向上的加速度响应明显降低,说明硬涂层可以很好地抑制次镜的加速度响应,提高光学系统的成像质量。

(4) 涂覆硬涂层后可以有效降低振动时次镜的刚体位移和面型精度。从 MTF 曲线和点列图上来看,刚体位移降低后,成像质量显著提升;从计算出的面型精度和面型云图来看,硬涂层减振后的次镜面型精度更加优异,能够承受更加恶劣的空间微振动环境。

## 参考文献:

- [1] Dong Deyi, Pang Xinyuan, Zhang Xuejun, et al. Key technology in the development of metering unloading support for space large aperture monomer reflector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2165-2179. (in Chinese)
- [2] Liu Fengchang, Li Wei, Zhao Weiguo, et al. Optimization design of secondary mirror for near space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200178. (in Chinese)
- [3] Tian Shitao, Xu Zhenbang, Qin Chao, et al. Support design of secondary mirror based on active constrained layer damping treatments [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1118001. (in Chinese)
- [4] Peng Rui, Chang Zhendong, Sun Lili. Research status of thermal barrier coatings in aero-engine application [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(3): 308-315. (in Chinese)
- [5] Pawlak W, Kubiak K J, Wendler B G, et al. Wear resistant multilayer nanocomposite  $WC_{1-x}/C$  coating on Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. *Tribology International*, 2015, 82: 400-406.
- [6] Luo Song, Zheng Li, Luo Hong, et al. A ceramic coating on carbon steel and its superhydrophobicity [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 486: 371-375.
- [7] Huang Shuke, Huang Wenrong, Liu Jianhui, et al. Internal friction mechanism of Fe-19Mn alloy at low and high strain amplitude [J]. *Materials Science and Engineering*, 2013, 560: 837-840.
- [8] Li Rongjiu, Deng Changguang, Hu Yongjun, et al. Research



- progress on characterization methods of thermal barrier coatings prepared by plasma spraying-physical vapor deposition [J]. *Surface Technology*, 2020, 49(11): 124-140. (in Chinese)
- [9] Yu Liming, Ma Yue, Zhou Chungen, et al. Damping efficiency of the coating structure [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 42(11): 3045-3058.
- [10] Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(5): 49-55. (in Chinese)