

文章编号 1004-924X(2016)05-1118-10

大口径空间相机像质的微振动频率响应计算

朱俊青^{1,2}, 沙 巍¹, 陈长征^{1*}, 张星祥¹, 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 由于大口径空间相机对空间环境变化和卫星内部振源引起的微振动十分敏感, 本文研究了影响成像质量的微振动频率响应的计算方法, 以改善相机的在轨动态成像质量。该方法通过实际光学模型取代线性光学模型, 建立微振动光机集成模型, 从而计算影响成像质量的微振动频率响应。首先, 建立大口径空间相机有限元模型, 进行结构频率响应计算, 得到采样频率点的光学表面节点位移和相位。然后, 通过蒙特卡洛分析方法, 建立微振动光机集成模型, 以均方根光学系统动态传递函数和视轴漂移衡量大口径空间相机动态成像性能。最后, 研制了大口径空间相机力学样机, 对其进行了振动试验, 验证了有限元模型的正确性。试验结果表明仿真结果与试验结果接近, 误差均在 5% 以内, 满足大口径空间相机动态成像质量分析的要求。

关键词: 大口径空间相机; 机载望远镜; 像质; 微振动; 视轴颤振; 集成分析

中图分类号: V447.3; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1118

Frequency response of imaging quality by micro-vibration for large-aperture space-borne telescope

ZHU Jun-qing^{1,2}, SHA Wei¹, CHEN Chang-zheng^{1*}, ZHANG Xing-xiang¹, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: may328@163.com*

Abstract: The imaging quality of a large-aperture space-borne telescope is very sensitive to the micro-vibration induced by space environmental variation and the vibration inner of a satellite. Therefore, this paper researches the calculation method of frequency response of imaging quality effected by the micro-vibration to improve the dynamic imaging quality of the satellite in orbit. By using a real optical model to replace the linear optical model, it establishes an optical-mechanical integrated model to calculate the frequency response of the micro-vibration. Firstly, it builds Finite Element Model(FEM) for a space-borne telescope to calculate the structural frequency response and to obtain the displacement and phase of the optical surface nodes for each sampling frequency point. Then, the Monte-Carlo statistical method is used to establish the the optical-mechanical integrated model, and the root-mean-square (RMS) of system dynamic Modulation Transfer Function(MTF) and the Line of

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2015-12-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

Sight(LOS) drift are analyzed to measure dynamic imaging performance of the large-aperture space-borne telescope. Finally, a structural prototype of large-aperture space-borne telescope is developed to verify the reliability of the FEM. The results show that the measured frequency is close to that of the FEM analysis and the error is under 5%, which meets the requirements of large-aperture space-borne telescopes for analysis of the dynamic imaging quality.

Key words: large-aperture camera; space-borne telescope; image quality; micro-vibration; line-of-sight jitter; integrated analysis

1 引言

随着遥感技术的发展,空间相机正朝着大口径、高分辨率、宽覆盖方向发展^[1-2]。大口径空间相机对成像环境要求苛刻,其系统尺寸大,对空间环境变化及振动敏感,设计难度较大^[3-4]。空间相机在轨受到空间环境波动和卫星内部振源(反作用飞轮等)的影响,光机结构会产生微振动。大口径空间相机较之中小型空间相机,由于系统焦距长,分辨率高,结构尺寸大,系统刚性低,对微振动的响应较大^[5-7]。

微振动易导致大口径空间相机的光机结构产生振动。一方面微振动造成各光学元件刚体位移和面形变化,影响光学系统瞬时传函,导致像质劣化。另一方面微振动造成视轴(line-of-sight, LOS)振动,光学像面相对成像器件振动,又因存在有限的成像曝光时间^[8],导致像质劣化:根据成像曝光时间视轴振动可分为低频和高速视轴运动;低频视轴运动造成视轴漂移(LOS drift)和视轴颤振(LOS jitter),前者导致景物重复或缺失,后者导致图像模糊(Image Smear);高速视轴运动主要引起视轴颤振,导致像质劣化^[9-11]。

同时,在大口径空间相机机动成像过程中,主要振源(反作用飞轮等)工作,在其工作频率点附近的振动剧烈。因此,为保证大口径空间相机在轨正常成像,在设计过程中,必须研究微振动对空间相机成像的影响。类似结构频率响应分析,以均方根光学系统动态传函 MTF_{RMSD} 和视轴漂移 LOS_d 为成像质量指标,研究不同频率的激励对遥感器成像质量的影响,从而有针对地对遥感器及平台进行优化设计,使微振动对成像质量的影响限制在设计要求内^[12-13]。

光机集成优化设计方法集成了结构分析、光学设计等技术,通过光机数据接口,将结构分析中

的光学元件的变形数据转换为光学设计模型数据,通过光学分析来计算光学指标^[14]。

由于光学元件面形在微振动影响下的变化较小^[15],现有文献均视光学元件为刚体,分析光学元件在一定变化范围内的刚体位移对、主光线位置等指标的灵敏度,并依此建立线性光学模型。但线性光学模型在系统 MTF 计算方面具有一定的近似性。

Genberg 等人^[9]通过光机集成模型,采用模态法计算成像质量的随机振动频率响应,通过 SigFit 软件计算得到随机振动对相机像质的影响,并将其区分为视轴颤振和视轴漂移。Uebelhart^[3]采用状态空间构建相机控制模型,可根据系统微振动输入,计算系统在微振动下的成像质量,方便建立控制模型,但状态空间经过了大量简化,仅适合于初步设计阶段的简单模型。上述两研究均采用线性光学模型研究视轴振动,未考虑微振动对系统瞬时传函的影响。

王红娟^[15]等针对实际空间相机动态成像过程,提出了空间相机动态成像分析,研究了特定输入下的瞬态成像质量分析,但未完整考虑包括焦平面在内的全链路光学系统在微振动环境下对系统成像的影响。

本文提出以实际光学模型取代线性光学模型,建立大口径空间相机光机集成模型;通过有限元频率响应分析,以均方根光学系统动态传函和视轴漂移为系统动态成像性能的指标,研究了大口径空间相机成像质量的频率响应;通过对力学样机进行了模态测试,验证了有限元模型的计算准确性。

2 空间相机微振动分析方法

2.1 空间相机微振动源

大口径空间相机光学系统如图 1 所示,采用大

视场离轴三反光学系统,实现了 5° 视场,系统焦距为 5 m, F 数为 10。空间相机在轨微振动来源见表 1。一般,微振动频率在 1 Hz~3 kHz 内;卫星在轨处于自由状态,振动的衰减周期很长,卫星平台及相机内部的振源输入到相机的激励为随机振动,一般以功率谱密度(PSD)的方式表示^[2]。

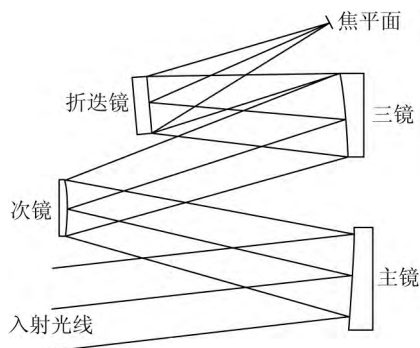


图 1 大口径空间相机光学系统示意图

Fig. 1 Diagram of optics for large aperture space borne telescope

表 1 空间相机微振动来源

Tab. 1 Source of mechanical vibration for space-borne telescope

来源	微振动类别	微振动源	振动类型
外部	环境扰动	太阳辐射压力噪声	随机振动
		重力场变化	周期振动
	结构热变形(轨道运动)	结构热变形(轨道运动)	周期振动
		结构变形(调姿)	瞬时振动
运动部件	推进器噪声	随机振动	
	飞轮噪声	随机振动	
平台内部	传动部件	太阳帆板运动机构	周期振动
		天线运动机构	周期振动
	反作用飞轮作用振动	周期振动	
相机内部	噪声	姿态传感器噪声	随机振动
		惯性传感器噪声	随机振动
	运动部件	调焦机构	瞬时振动
		次镜调整机构等	瞬时振动

2.2 成像质量的频率响应分析模型

大口径空间相机成像质量的频率响应计算流程如图 2 所示。首先,根据有限元分析理论,求解得到空间相机各光学表面节点在各频率 ω 激励

下的响应,即各节点运动的幅值 $\{A\}$ 和相位 $\{\varphi\}$:

$$\{u\} = \{A\}e^{-i(\omega t + \varphi)}. \quad (1)$$

然后,根据实际光学系统曝光成像过程,采用蒙特卡洛分析方法,在一个简谐运动周期内进行等概率采样成像初始点;继而以成像初始点为起始点,在成像曝光时间内均匀采样,统计成像曝光时间内的光学指标。单个采样点为遥感器的一个变形状态,将该变形状态所对应的各光学表面节点位移数据经拟合,得到各光学表面的刚体位移,据此在未变形的光学系统的基础上建立变形后的光学模型。经光学分析,即得到光学系统瞬时传函、视轴颤振等光学指标。最后,根据得到的成像曝光时间内的各光学指标的数据,分析求得等概率成像初始点采样条件下的均方根光学系统动态传函 MTF_{RMSD} 和视轴漂移 LOS_d 。以 MTF_{RMSD} 和 LOS_d 为成像质量的评价指标,得到空间相机成像质量的频率响应。

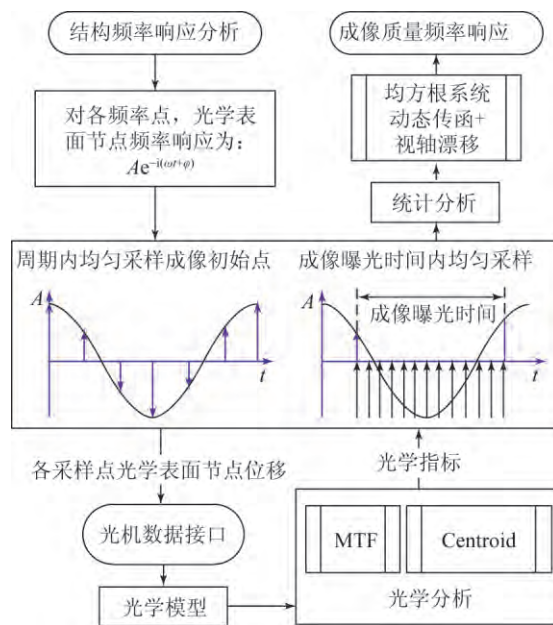


图 2 成像质量频率响应计算流程图

Fig. 2 Flowchart of image quality frequency response calculation

2.3 光学模型的建立与光学分析

大口径空间相机为离轴三反光学系统,其几何中心偏离光轴。反射镜的刚体位移一般定义为相对其中心坐标系的位移和转角;而在光学分析软件中,光学表面定义在局部顶点坐标系中,光学表面的刚体位移定义为相对顶点坐标系的位移和

转角,二者存在转换关系,如图 3 所示。

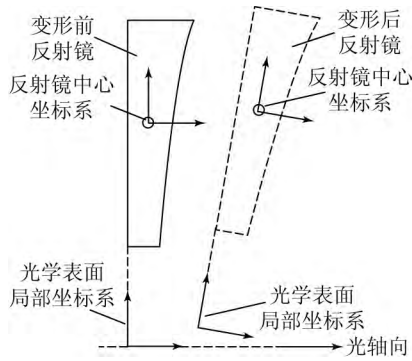


图 3 反射镜刚体位移与光学表面刚体位移

Fig. 3 Diagram of transfer FEA results to optical codes

按照实际反射镜的刚体位移变化建立光学系统,完善视场等系统信息,完成光学模型的建立。设置±1、±0.7、±0.5、±0.3和0等9个归一化视场,通过光学设计软件计算并输出各视场在截止频率处的光学系统 MTF;通过光学设计软件计算并输出各视场主光线在焦平面的位置得到像点在焦平面上的位置。

2.4 成像质量指标的统计分析方法

大口径空间光学系统光学模型如图 1 所示。视场为 5°,由于视场较大,需要在±1、±0.7、±0.5、±0.3和0归一化视场进行成像质量频谱分析。成像质量的频谱分析计算流程如图 4 所示。

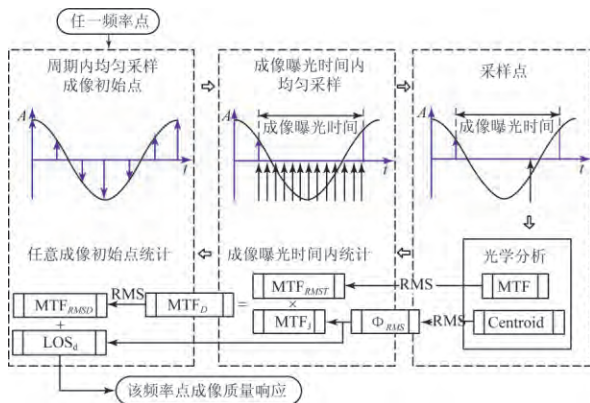


图 4 成像质量指标的统计分析流程图

Fig. 4 Block chart of image quality for micro-vibration

首先,在成像曝光时间内的采样分析,得到各采样点的光学系统传函 MTF_i 和主光线在焦平面的位置 Centroid。然后,对成像曝光时间内的采样进行统计,设共采样 p 次计算成像曝光时间内

瞬时光学系统传函的均方根值 MTF_{RMST} :

$$MTF_{RMST} = \left(\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p MTF_i^2 \right)^{1/2}. \quad (2)$$

同时,对于视轴振动,首先计算成像曝光时间内的像点均方根直径 Φ_{RMS} (RMS Spot Diameter),然后计算不同采样曝光时间之间的视轴运动,即视轴漂移 LOS_d ,计算方法如图 5 所示。

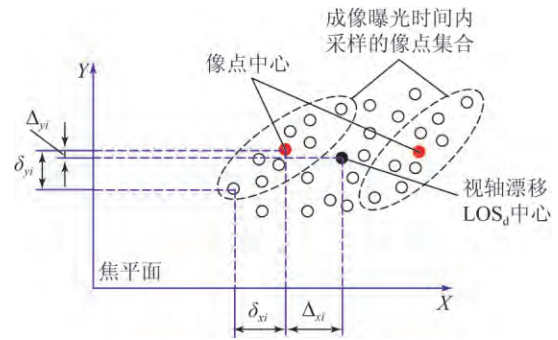


图 5 视轴颤振示意图

Fig. 5 Image motion on focal plane

首先,对某一频率点单个周期内均匀采样成像初始点 q 次;然后,对每个初始点进行成像曝光时间内的采样,如前述共采样 p 次,在焦平面内得到 p 个像点,通过最小二乘法,寻找像点中心,优化函数为:

$$\min \sum_{i=1}^p \delta_{ri}^2, \quad (3)$$

$$\delta_{ri} = (\delta_{xi}^2 + \delta_{yi}^2)^{1/2}, \quad (4)$$

得到像点中心后,计算像点均方根直径 Φ_{RMS} 。

$$\Phi_{RMS} = 2 \left(\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p \delta_{ri}^2 \right)^{1/2}. \quad (5)$$

然后,计算采样曝光时间之间的视轴运动,即视轴漂移 LOS_d 。如前所述,共对成像初始点采样 q 次,则得到 q 个视轴漂移中心 (LOS_d Center),同样地采用最小二乘法,寻找像点中心集合的最小二乘中心:

$$\min \sum_{i=1}^q \Delta_{ri}^2, \quad (6)$$

$$\Delta_{ri} = (\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2)^{1/2}, \quad (7)$$

得到视轴漂移中心后,计算视轴漂移 LOS_d 。

$$LOS_d = 2 \left(\frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q \Delta_{ri}^2 \right)^{1/2}. \quad (8)$$

视轴颤振分为低频颤振和高频颤振。在文献 [16]中,假设视轴颤振为简谐振动,设激励频率为

f , 探测器空间频率为 ξ , 则视轴颤振对系统 MTF 的影响与成像电子学的曝光时间 T 有关。

当 $2\pi fT < 2\pi$, 为低频颤振, 根据定速视轴颤振 MTF 模型, 定速位移为 Φ_{RMS} , 则视轴颤振 MTF 下降为 MTF_J :

$$MTF_J(\xi) = \text{sinc}(\pi\xi\Phi_{RMS}). \quad (9)$$

当 $2\pi fT \geq 2\pi$, 为高频颤振, 根据定速视轴颤振 MTF 模型, 积分时间内的最大位移为 Φ_{RMS} , 高频颤振条件下 MTF_J 为:

$$MTF_J(\xi) = J_0(2\pi\xi\Phi_{RMS}). \quad (10)$$

瞬时光学系统传函的均方根值为 MTF_{RMST} , 视轴颤振对像质影响的传函为 MTF_J , 二者与光学动态传函 MTF_D 的关系为:

$$MTF_D = MTF_{RMST} \times MTF_J. \quad (11)$$

最后, 由于成像初始点随机选择, 假定概率为均匀分布, 如前述共均匀采样 q 次, 则该频率点成像质量指标为均方根光学系统动态传函 MTF_{RMSD} :

$$MTF_{RMSD} = \left(\frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^{i=q} MTF_{Di}^2 \right)^{1/2}. \quad (12)$$

3 空间相机成像质量频率响应分析

3.1 大口径空间相机结构频率响应分析

大口径空间相机有限元模型如图 6 所示, 光学镜头通过连接座与平台连接。为仿真遥感器工作状态的频率特性, 模型中不考虑其发射连接座^[17](入轨后脱离连接), 其模态较发射状态低, 前 6 阶模态频率见表。对大口径空间相机有限元模型进行频率响应分析, 分别沿着 X、Y 和 Z 轴 3 个方向对其施加 0.1 g 加速度激励, 频率为 1 Hz ~ 3 kHz, 设置结构阻尼为 3%。计算结果如图 7 所示。

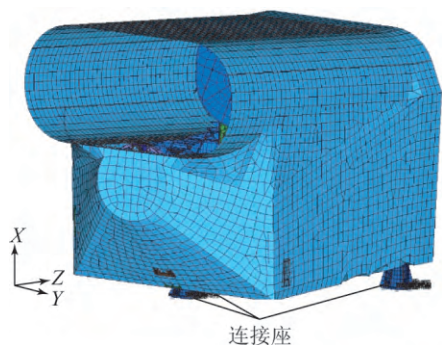


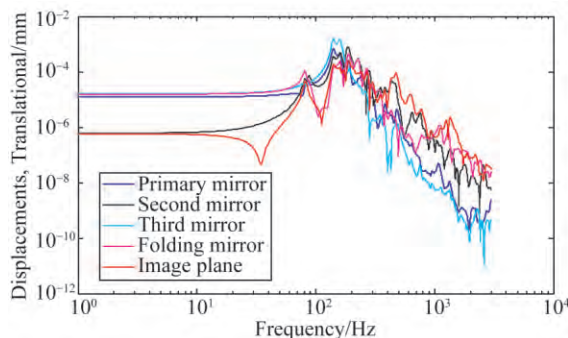
图 6 大口径空间相机有限元模型

Fig. 6 FEM of large aperture space borne telescope

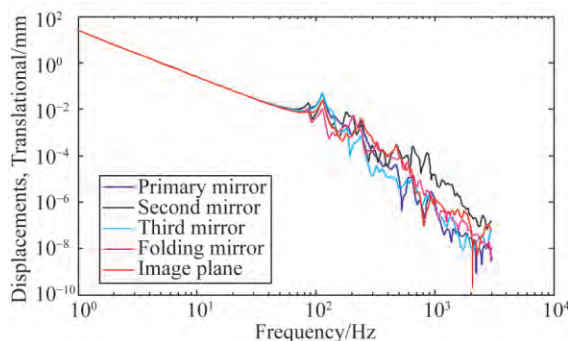
表 2 空间相机在轨状态模态分析结果

Tab. 2 Mode analysis results of space-borne telescope on orbit

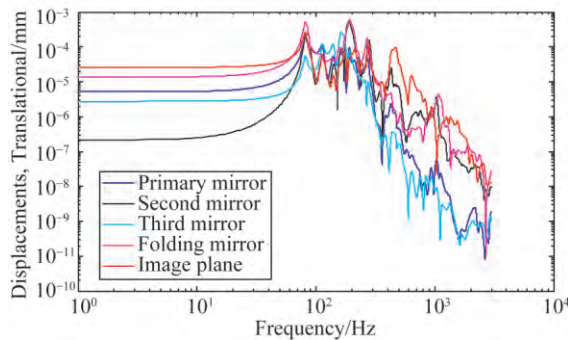
模态阶数	频率/Hz	振型描述
1	81.3	整机绕 Y 轴转动
2	87.1	整机绕 Z 轴转动
3	113.4	主三镜 Y 向同向摆动
4	139.8	主三镜 Y 向异向摆动
5	151.8	主镜 Y 向转动
6	160.3	三镜 X 向摆动



(a) X 向
(a) X axis



(b) Y 向
(b) Y axis



(c) Z 向
(c) Z axis

图 7 各光学元件正弦振动响应曲线

Fig. 7 Frequency response of optical elements

3.2 刚体位移计算

结构频率响应分析得到了光学表面节点的位移和相位数据,经过光机数据处理,计算得到各光学表面的刚体位移。

图 8 所示为 X 向加速度激励下,在 81,87,113,140,152 和 160 Hz 等 6 个模态频率点处的光学元件 X 向刚体位移随相位的变化。可以看出,在频率较低情况下,其位移响应有相位差,频率较高处响应相位较一致。由于相位差的存在,不能简单地以灵敏度作为光学指标的计算依据,应当以实际光学模型计算光学指标。

3.3 成像质量频率响应分析

给定 TDICCD 探测器^[18]尺寸为 7 μm,假定 TDICCD 行频为 15 kHz,积分级数为 144 级,则积分时间为 9.6 ms。典型的各视场周期内像点位置如图 9 所示,频率点 81,87 和 152 Hz,周期内均匀采样 45 次,可以看出像点位置变化并非简单正弦变化。计算得到各视场内均方根 MTF_{RMSD} 及均方根 φ_{RMS} 与频率关系如图 10 和 11 所示。各视场内均方根光学系统动态传函 MTF_{RMSD} 及视轴漂移 LOS_d 与频率关系如图 12 和 13 所示。

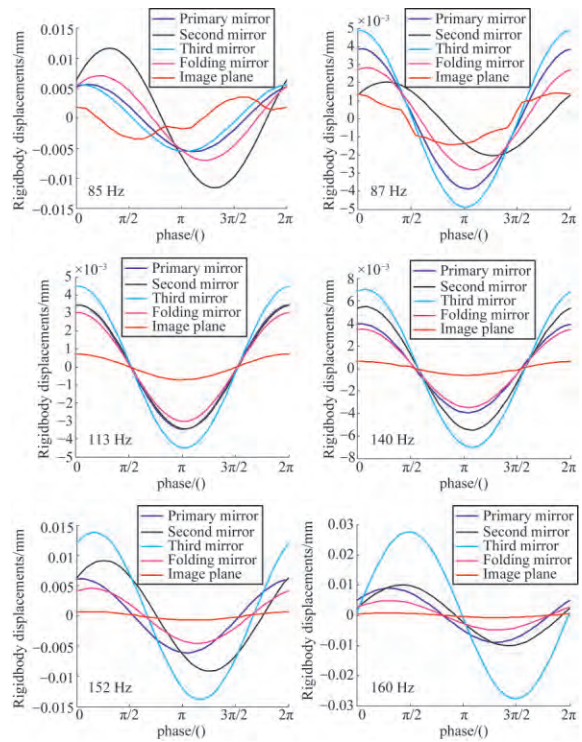


图 8 各光学元件 X 向刚体位移周期内变化
Fig. 8 Rigid body translation of X for optical elements

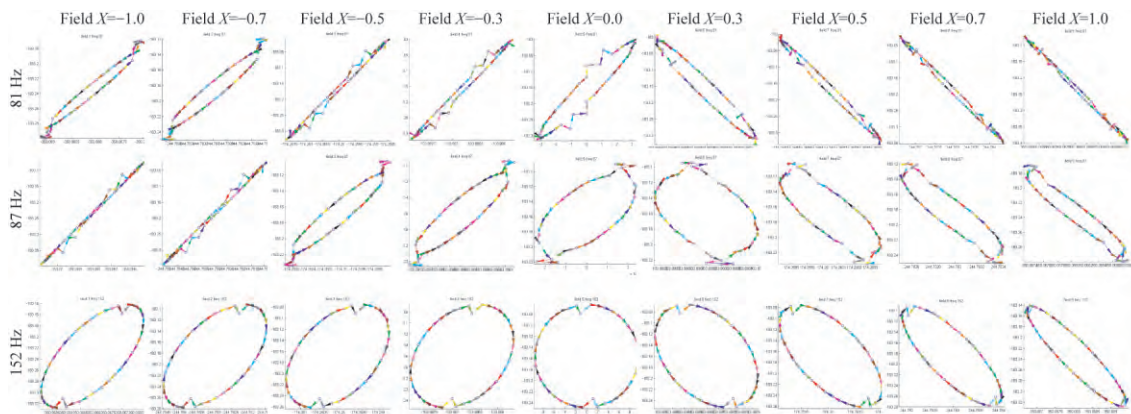


图 9 像点在像面内周期内变化
Fig. 9 Line of sight changes in a period

由图 10 可以看出各方向激励对光学系统传函的影响不同,由于 X 和 Z 方向刚度较 Y 向刚度低,对 X 和 Z 方向而言,由于在低频激励下各光学元件的振动存在相位差,因此引起了瞬时光学

传函的降低。对于 Y 向激励,如图 8 所示,在高频区域次镜位移相对较大,引起瞬时 MTF 下降,但下降较小。

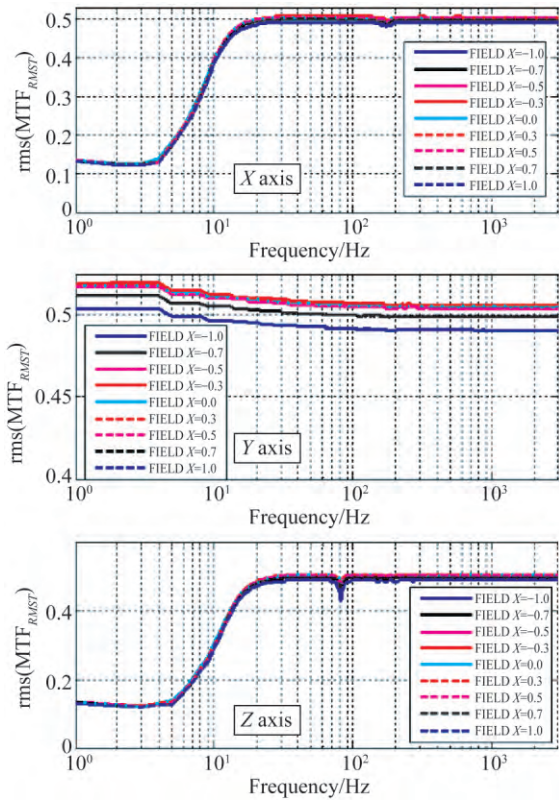


图 10 均方根 MTF_{RMS} 的频率响应
Fig. 10 Frequency response of MTF_{RMS}

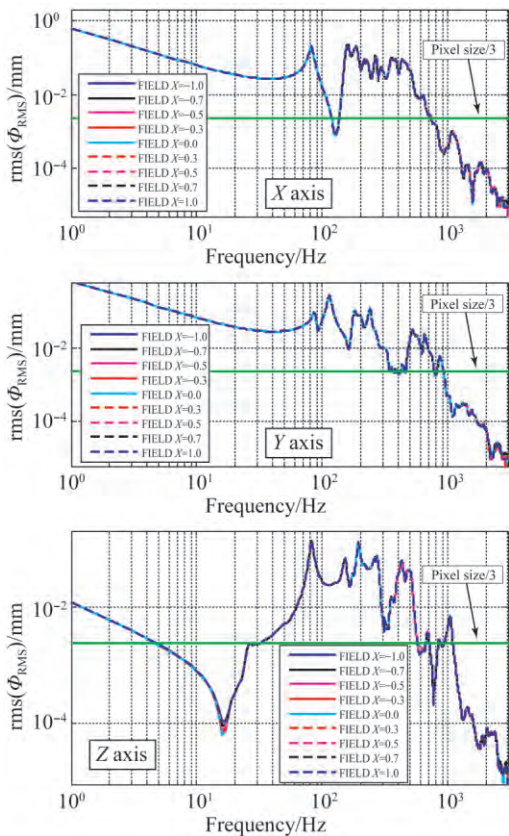


图 11 均方根 Φ_{RMS} 的频率响应
Fig. 11 Frequency response of Φ_{RMS}

由图 11 可以看出,在各方向模态频率处的视轴颤振较为激烈,在均方根 Φ_{RMS} 均在 $10 \mu\text{m}$ 量级,而像元尺寸为 $7 \mu\text{m}$,严重影响了成像质量,需要着重控制输入。根据式(9),使 $MTF_j < 0.6$,则视轴振动幅值不可超过像元尺寸的 $1/3$ 。3 个方向激励频率大于 700 Hz 的均方根 Φ_{RMS} 小于像元尺寸的 $1/3$,对成像影响不明显。因此,需要在较大区域内控制系统输入,限制视轴颤振,保证动态成像。

由图 12 可以看出,视轴振动对 MTF_{RMSD} 影响很大,若需保证动态传函大于 0.1(假定电子学传函为 0.5)则均方根光学系统动态传函 MTF_{RMSD} 应大于 0.2,因此在 MTF_{RMSD} 小于 0.2 的频率范围应控制卫星平台输入,保证动态成像。

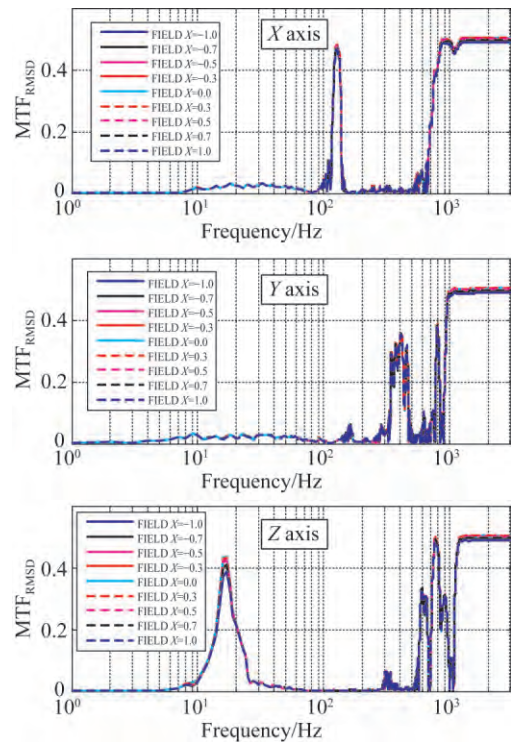


图 12 均方根光学系统动态传函 MTF_{RMSD} 的频率响应
Fig. 12 Frequency response of MTF_{RMSD}

由图 13 可以看出,由于成像积分时间为 9.6 ms ,时间较长,频率约为 104 Hz ,在该频率 4 倍内的视轴漂移明显。在各方向一阶模态频率点附近的振动尤为剧烈,大于 10 个像元尺寸,其余约在 10 个像元内。因此在模态频率点附近需要减小输入。同时,由于成像曝光时间长,视轴漂移现象不明显,视轴颤振 MTF 下降较大。

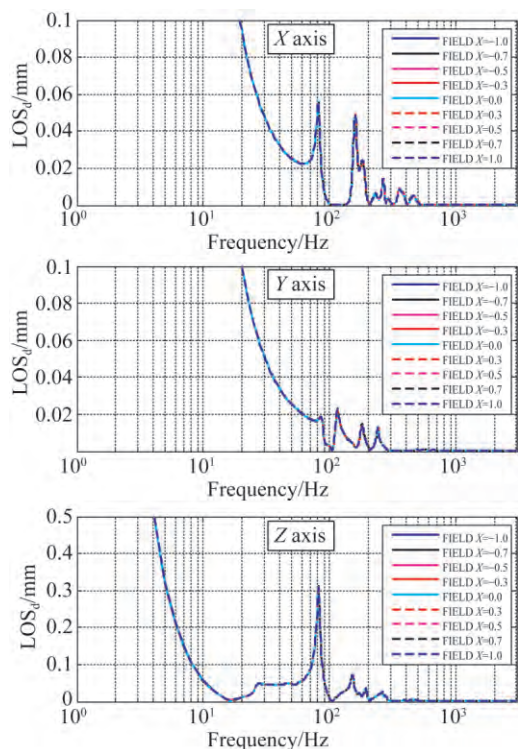


图 13 视轴漂移 LOS_d 的频率响应
Fig. 13 Frequency response of LOS_d

4 测量实验与结果

为验证有限元模型的准确性,研制大口径空间相机力学样机(材料均为硬铝合金),使用振动台进行 X,Y,Z 轴 3 方向振动试验,试验现场如图 14 所示,坐标与图中有限元模型坐标一致,进行 3 个方向 0.7 g,10~100 Hz,4 oct/min 的正弦振动试验,以及正弦振动前后 0.1 g,10~2 000 Hz,4 oct/min 的正弦扫描,主镜正弦振动响应曲线如图 15 所示。试验结果与仿真结果基频对比如表 3 所示。对比表中数据,可以发现仿真结果与试验结果比较接近,误差均在 5% 以内,验证了有限元仿真模型的准确性。

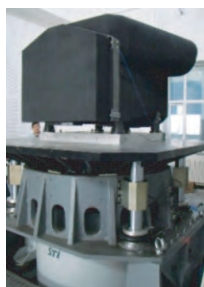


图 14 大口径空间相机结构样机振动试验
Fig. 14 Image motion on focal plane

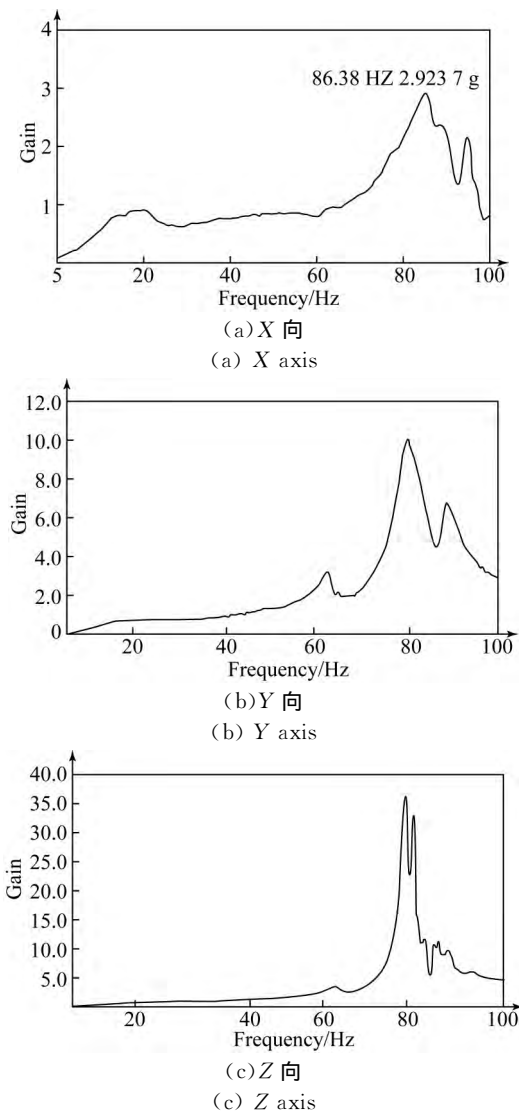


图 15 主镜正弦振动响应曲线
Fig. 15 Frequency response of primary mirror

表 3 力学样机基频仿真与试验对比结果
Tab. 3 Results comparison between test and FEM analysis for structural prototype

位置	方向	仿真结果基频/Hz	试验结果基频/Hz	偏差/%
主镜	X	85	86	1.2
	Y	83	80	3.6
	Z	82	78	4.9
三镜	X	99	95	4.0
	Y	83	90	3.6
	Z	82	78	4.9
次镜	X	>100	>100	—
	Y	84	80	4.8
	Z	82	78	4.9
折叠镜	X	>100	>100	—
	Y	84	80	4.8
	Z	82	78	4.9

5 结 论

本文阐述了大口径空间相机在微振动条件下的动态成像质量的集成分析方法,分析了微振动条件下的成像过程,以均方根光学系统动态传函 MTF_{RMSD} 和视轴漂移 LOS_d 为成像质量的评价指标,计算空间相机成像质量的频率响应。

参考文献:

- [1] STAHL H P, POSTMAN M, MOSIER G, *et al.*. AMTD:update of engineering specifications derived from science requirements for future UVOIR space telescopes [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 2014;91431T-91431T-8.
- [2] MILLER D W, DE WECK O L, MOSIER G E. Framework for multidisciplinary integrated modeling and analysis of space telescopes [C]. *Workshop on Integrated Modeling of Telescopes, International Society for Optics and Photonics*, 2002;1-18.
- [3] UEBELHART S A. *Non-deterministic design and analysis of parameterized optical structures during conceptual design* [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [4] 刘巨,董得义,辛宏伟,等. 大口径反射镜组件温度适应性 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21 (12): 3169-3175.
LIU J, DONG D X, XIN H W, *et al.*. Temperature adaptation of large aperture mirror assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (12): 3169-3175. (in Chinese)
- [5] HYDE T T, HA K Q, JOHNSTON J D, *et al.*. Integrated modeling activities for the James Webb Space Telescope:optical jitter analysis [C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 2004;588-599.
- [6] HILKERT J M, AMIL D L. Structural effects and techniques in precision pointing and tracking systems: a tutorial overview [C]. *SPIE*, 2010, 7696:76961C.
- [7] 刘祥意,张景旭,吴小霞,等. 环境对大口径 SiC 轻量化主镜视宁度的影响[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(3):776-783.
LIU X Y, ZHANG J X, WU X X, *et al.*. Affect of environment on mirror seeing of large-aperture SiC lightweight primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):776-783. (in Chinese)
- [8] 刘海龙,韩诚山,李祥之,等. 机械拼接时间延迟积分 CCD 空间相机的振动参数检测[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(3):729-737.
LIU H L, HAN CH SH, LI X ZH, *et al.*. Vibration parameter measurement of TDICCD space camera with mechanical assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):729-737. (in Chinese)
- [9] GENBERG V, MICHELS G, DOYLE K B. Integrated modeling of jitter MTF due to random loads [C]. *Proc. SPIE*, 2011, 8127:81270H-81270H.
- [10] PRIVAT M. On ground and in orbit microvibrations measurement comparison [J]. *European Space Agency-publications-esa SP*, 1999, 438: 181-186.
- [11] 张宇,张立国,张星祥. 行间转移大面阵 CCD 相机 Smear 噪声实时去除[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21 (9):2388-2394.
ZHANG Y, ZHANG L G, ZHANG X X. Real-time elimination of Smear noise for large interline transfer area CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2388-2394. (in Chinese)
- [12] DOYLE K B. Structural line-of-sight jitter analysis for MLCD [C]. *Optical Engineering + Applications, International Society for Optics and Photonics*, 2007;66650I-66650I-12.
- [13] 孙航,张海波,曹立华,等. 大口径光电探测设备主镜晃动的误差补偿[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22 (1):85-91
SUN H, ZHANG H B, CAO L H, *et al.*. Error compensation for primary mirror shaking of large aperture optical detection equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):85-91. (in Chinese)
- [14] JUERGENS R C, CORONATO P A. Improved

- method for transfer of FEA results to optical codes [C]. *Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting, International Society for Optics and Photonics*, 2003:105-115.
- [15] 王红娟. 微振动对空间相机像质影响研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
WANG H J. *Research on Space Camera Image Degradation Induced by Micro-vibration* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [16] HADAR O, FISHER M, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of modulation transfer function [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(3):581-589.
- [17] 王书新, 李景林, 齐光, 等. 空间相机用爆炸螺栓防护装置[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12):3318-3323.
WANG SH X, LI J L, QI G, *et al.*. Protecting device for explosive bolt in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3318-3323. (in Chinese)
- [18] 孙斌, 李景林, 张星祥, 等. 600 mm 长焦平面时间延迟积分 CCD 的交错拼接[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11):2908-2913.
SUN B, LI J L, ZHANG X X, *et al.*. Interleaving assembly of TDICCDs on 600 mm focal plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11):2908-2913. (in Chinese)

作者简介:



朱俊青(1990—),男,河南周口人,博士研究生,2011年于上海交通大学获得学士学位,主要研究方向为光机结构设计及 CAE。E-mail: zhujunqing2014@163.com

通讯作者:



陈长征(1976—),男,山东德州人,博士,副研究员,2000年哈尔滨工业大学获学士学位,2007年于中科院长春光机所获得博士学位,主要研究方向为光机热集成仿真。E-mail: may328@163.com

导师简介:



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。E-mail: reny@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)