

doi:10.3788/gzxb20134210.1212

## 航天器微振动对空间相机像质的影响

王红娟<sup>1,2</sup>, 王炜<sup>1</sup>, 王欣<sup>1,2</sup>, 邹刚毅<sup>1</sup>, 李刚<sup>1,2</sup>, 樊学武<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**采用集成模型法研究了航天器微振动对空间相机像质的影响, 针对探测器 CCD 曝光积分时间内动态成像系统像移等价于静态像点模糊, 提出动态成像评价指标, 并进行了动态成像分析. 介绍了空间相机受到的各种微振动干扰源, 利用有限元软件建立了相机的有限元模型, 并对相机进行动力学分析, 获取了光学元件的微振动量, 将其输入到光学软件 CODE V, 得到系统退化的像面点列图、调制传递函数、像移量等分析结果. 这种方法适用于任何振幅、频率形式的复杂微振动, 且有效减少运算量. 利用该方法完成微振动干扰对空间相机像质退化的仿真模拟, 结合动态成像评价标准分析判断微振动对系统像质的影响程度, 得到光学元件微振动与像质退化之间的关系, 为系统优化设计和隔振补偿措施提供参考依据.

**关键词:**微振动; 空间相机; 集成模型; 像质退化

中图分类号: V57

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)10-1212-6

## Space Camera Image Degradation Induced by Satellite Micro-vibration

WANG Hong-juan<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1,2</sup>, ZOU Gang-yi<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1,2</sup>, FAN Xue-wu<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to evaluate the space camera image degradation induced by micro-vibration, an integrated modeling was utilized. During the CCD integrated time, the image motion of dynamical imaging system equaled to static image spot blurring, dynamical imaging evaluation criterion was proposed and dynamical imaging was analyzed. All kinds of disturbance sources were introduced, the finite element model (FEM) of space camera was founded, and the jitter values of optical elements were acquired by dynamic analysis with finite element software. The analysis results were imported to optical design software CODE V, the system spot diagram and MTF were attained, and the image motion was calculated quickly. The integrated modeling which shortens the computational quantity effectively suits to any type of micro-vibration. This method was utilized to simulate the space camera image degradation induced by micro-vibration, and the dynamical imaging evaluation criterion was used to estimate the effects on imaging system. The relationship between micro-vibration and image degradation was achieved, that provides important references for system optimum design and vibration isolation.

**Key words:** Micro-vibration; Space camera; Integrated modeling; Image degradation

## 0 引言

随着空间相机分辨率不断提高, 相机尺寸和焦

距不断增大, 而空间运行环境极其复杂, 微振动对大尺寸、高分辨率空间相机成像质量的影响尤为突出. 微振动是指航天器在轨运行期间, 星上转动部件高

基金项目: 中国科学院“西部之光”基金资助

第一作者: 王红娟(1987—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为空间微振动对高分辨率相机像质退化分析. Email: hongjuanwang@163.com

导师(通讯作者): 王炜(1974—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为空间相机结构设计与分析. Email: wangwei@opt.ac.cn

收稿日期: 2012-03-21; 录用日期: 2013-04-02

速转动、大型可控构件驱动机构步进运动、变轨调姿期间推力器点火工作、大型柔性结构进出阴影冷热交替诱发扰动等都会使星体产生一种幅值较小、频率较高的抖动响应<sup>[1]</sup>. 在空间相机成像过程中,这些微振动干扰造成相机各光学元件间及相机与目标之间存在相对运动,使图像模糊不清,分辨率下降<sup>[2]</sup>. 航天器卫星微振动干扰对空间相机成像质量有重要影响,实际拍摄得到的图像分辨率低于地面实验照相极限分辨率就是充分证明<sup>[3]</sup>.

Ofer Hadar 等将微振动引起的像移近似认为线性、正弦形式,振动频率分为高频、低频,对系统调制传递函数进行理论推导和计算,分析其对成像系统的影响,并用实验进行了验证<sup>[4]</sup>. Timothy Trott 等研究了不同曝光模式下的像移对成像分辨率的影响,并采用调制传递函数进行评价<sup>[5]</sup>. 樊超等将相机曝光时间小于振动周期视为低频颤振,然后把相机看做一个刚体,分析相机在滚动、俯仰、偏航三个方向的颤振对相机成像质量的影响<sup>[6]</sup>. 徐鹏等分析了三个方向微振动,用调制传递函数作为评价指标,并建立了地面仿真系统进行验证<sup>[7]</sup>. 张博文等通过集成分析得到微振动干扰对系统图像调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的影响<sup>[8]</sup>.

实际成像系统中,探测器 CCD 积分时间内微振动对成像影响是个动态过程,本文根据动态像点偏移等价于静态像点弥散模糊,提出了动态成像评价指标. 在光、机共存的系统中,集成模型法是解决多学科子系统相互关联的有效方法. 本文将集成模型法运用在微振动对相机像质退化分析上,首先分析空间相机的干扰源,其次建立相机有限元模型讨论微振动引起光学元件的机械微位移,将微位移量输入到光学软件 CODE V 中,进行必要的像质退化分析,最后根据动态评价指标判断微振动对成像系统的影响程度.

## 1 微振动干扰源

空间相机在轨运行时,微振动干扰主要来自两方面:外界太空环境和航天器运动部件. 航天器在太空中,不可避免地会遭到太阳光压、空间粒子流对太阳帆板、航天器整体或者单个器件的冲击,以及大型柔性结构进出阴影冷热交替诱发的扰动<sup>[9]</sup>. 进入在轨运行阶段,航天器的任务才开始,内部各个子系统也开始工作,比如太阳帆板展开、指向调姿机构运动、动量轮转动都会产生微振动. 而且在太空中的微重力环境下,航天器处于自由状态,振动衰减很慢,可能会引起长期振动,所以对空间干扰非常敏感.

微振动干扰对空间成像系统像质有很大的影

响,轻者使分辨率下降,重者使图像模糊,更有甚者可能会导致整个系统瘫痪. 例如 1958 年美国第一颗卫星“探险者-1 号”,由于其四根鞭状天线的振动耗散很多能量而导致卫星翻滚,任务失败;1982 年美国发射的“陆地卫星-4”的观测仪器旋转部分,受到太阳帆板驱动系统的干扰而产生微小的振动,大大降低了图象质量;1998 年美国的一台通讯卫星由于天线的弹性振动引起姿态失稳,导致卫星通信的数日中断而造成巨大损失<sup>[10]</sup>. 另外,我国资源一号卫星 02 星成功发射是克服微振动干扰很好的证明,遥感应用专家评价认为:02 星像质之所以比 01 星的清晰、纹理丰富,克服相机中侧视反射镜振动引起的图像扰振就是一个原因<sup>[11]</sup>. 由此可见,外界太空环境或者航天器部件都可能微振动干扰源,影响系统成像质量,因此,研究微振动对高分辨率相机成像影响具有重要意义.

## 2 机械模型建立和响应分析

### 2.1 相机有限元模型建立

以某空间相机为例,利用 Hyperworks 强大的几何处理和网格划分功能完成实体几何模型到有限元模型的转换,利用 MSC. Patran/Nastran 进行材料和单元属性等定义,并进行计算和后处理. 该相机有限元模型如图 1,包含 17 种材料,31 种单元属性,共计 19 779 个节点.

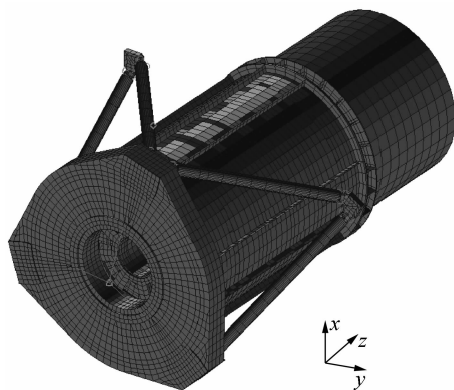


图 1 空间相机有限元模型

Fig. 1 Finite element model of space camera

微振动对光学系统的影响表现为光学系统结构整体振动或者光学元件之间位置变化. 光学元件位置变化包括平移、倾斜相对位置变化和面形变化,但无论是相对位置变化还是面形变化都直接改变了光学系统,影响最终的成像质量.

光学元件面形变化是时变的,实际中可以采用面形变化的最大值评价光学系统. 由有限元分析软件可以得到光学作用面节点位移量,为了得到最终的面形变化均方根 (Root Mean Square, RMS) 值、

峰谷值(Peak-to-Valley, P-V), 需要通过 Zernike 多项式来拟合, 表 1 为该相机主次镜的面形仿真分析结果. 从表中可以看出航天器的空间干扰对主、次镜的反射面面形变化非常小, 完全在系统设计的许用值之内, 是可以忽略的<sup>[12]</sup>.

表 1 微振动引起的反射面面形变化

Table 1 Deformation of reflective caused by micro-vibration

Optical element	RMS tolerance designed/nm	Maximal P-V during micro-vibration/nm
Primary mirror	42.017 92	7.02
Secondary mirror	29.235 36	3.21

## 2.2 动力学响应分析

光学元件的面形变化在许用值范围内, 说明光学元件弹性变形很小, 光学元件自身可以看作是一个刚体而非柔体. 根据理论力学知识, 刚体上各个点的运动一致, 对于刚体的位移量可以通过查看其上任意一点的位移量而得知. 通过设定一个固定坐标系, 直接比较振动前后坐标系位置关系就可以确定光学元件的位移情况. 由于光学系统校正组光学元件的尺寸较小, 且光学结构刚度足够高, 完全可以视为一体, 所以重点分析口径较大的主、次镜. 为了分析微振动环境下主、次镜的相对位置变化, 需要对该相机进行动力学分析.

### 1) 模态分析

模态分析是确定结构振动特性的一种技术, 通过模态分析可以得到系统共振频率和振型, 也可以作为下一步动力学分析的准备. 通过对相机有限元模型进行模态分析, 得到各个方向的基频, 如表 2 所示, 其中  $z$  轴为光轴方向,  $x$ ,  $y$  轴垂直于光轴, 它们之间满足右手法则.

表 2 相机模态分析结果

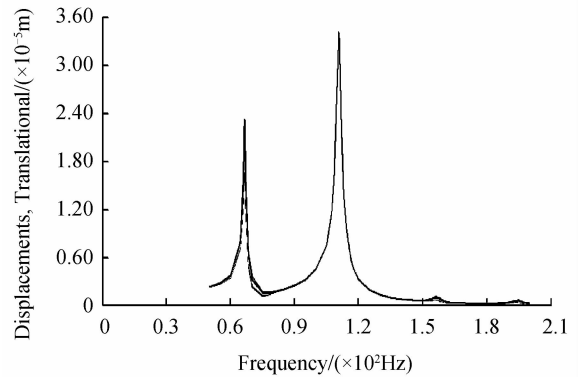
Table 2 Model analysis results of the space camera

Direction of natural frequency	$x$	$y$	$z$
$F_n/\text{Hz}$	66.56	66.28	110.71

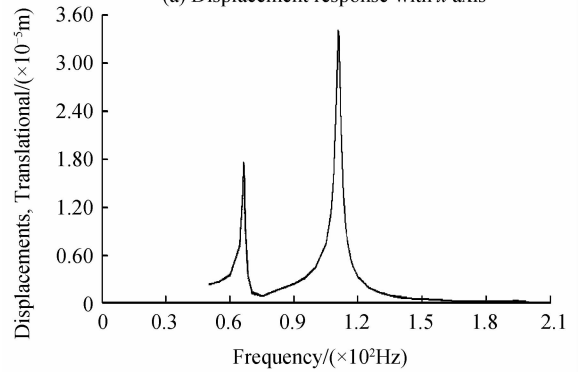
### 2) 频率响应分析

频率响应分析是确定一个结构在已知频率的正弦载荷作用下结构响应的技术. 频响分析时, 沿着  $x$ ,  $y$ ,  $z$  轴三个方向对模型施加单位加速度载荷, 主镜位移响应曲线如图 2.

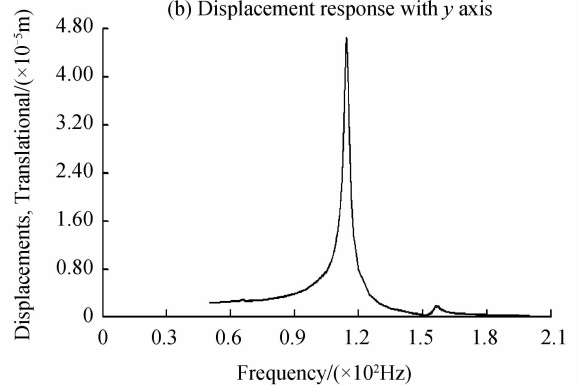
由频响响应曲线看出, 主、次镜上选取的各节点频响曲线几乎完全重合, 说明它的刚性特性很明显. 主、次镜均在 110 Hz 附近的位移响应最大, 与模态分析结果相近, 验证了模态分析的准确性. 以此频率作为瞬态响应分析的振动位移载荷, 模拟最恶劣工况作用下空间相机受扰动影响.



(a) Displacement response with  $x$  axis



(b) Displacement response with  $y$  axis



(c) Displacement response with  $z$  axis

图 2 主镜的位移响应图

Fig. 2 Displacement response diagram of primary mirror

### 3) 瞬态响应分析

集成建模中的机械模型可以仿真模拟加载不同振幅、频率的复杂微振动干扰时造成相机各光学元件的微抖动量. 任何复杂激励都可以加载至相机有限元模型, 从而得到响应的光学元件微振动响应. 下面以模态分析中  $x$ ,  $y$ ,  $z$  轴的基频频率 66 Hz 和 110 Hz 为例进行瞬态响应分析. 瞬态响应分析同样对主、次镜沿三个轴向施加频率为 66 Hz 和 110 Hz 两部分组成的位移载荷, 幅值为  $1 \mu\text{m}$ . 利用有限元分析软件将节点响应数据输出, 通过 Zernike 多项式拟合法运算得到主镜 3 个刚体平动位移和 3 个转动角度. 同样的方法得到次镜的平动位移和转动角度, 表 3 所示为沿光轴方向位移载荷作用下空间相

机主、次镜的微位移稳态响应值. 选取结构响应达到稳态后的微位移数据输入到 CODE V 软件光学系

统模型中,便可以作进一步的分析,对像质进行评价.

表 3 沿光轴方向位移载荷作用下主、次镜的位移响应

Table 3 Displacement response of primary and secondary mirror with optical axis displacement loading

Jitter	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta z/m$	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$
Primary mirror	-1.409 628e-010	-3.104 910e-009	1.877 180e-011	5.242 467e-005	6.428 233e-009	-1.199 618e-007
Secondary mirror	-6.005 510e-008	-3.882 759e-010	-1.744 543e-009	-1.559 658e-006	-2.461 364e-007	-8.535 317e-006

### 3 光学系统模型及仿真分析

如何将光学元件机械微位移与像质退化联系起来,光学模型正是桥梁. 光学元件微位移响应引入到光学软件 CODE V 中,便可以得到该光学系统对应的像面波像差、点列图、光学传递函数等各种像质分析. 结合相机光学系统模型(如图 3),分析主、次镜在上述工况时造成的像质退化.

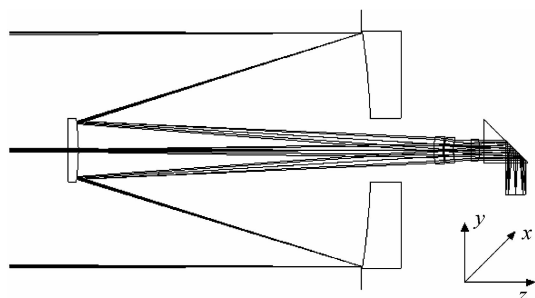


图 3 空间相机光学系统模型

Fig. 3 The optical system model of space camera

#### 3.1 微振动对相机成像影响的静态评价

将主、次镜在表 3 中的平动位移和转动角度结果输入到 CODE V 中,其它光学元件不动,此时可得到相机在沿光轴方向位移载荷作用下光学系统的成像情况. 不同工况的像质比较分析可以得到像点偏移方向、移动量、弥散斑直径以及相机分辨率频率的调制传递函数.

Footprint 项提供像点位置,比较两个不同工况的 Footprint 项可以得到像点移动方向和移动量,如表 4 是静态系统和在光轴方向加载位移载荷对应两个状态的 Footprint 项,像面沿光轴方向位置不变,在像面内中心视场像点的坐标位置分别为(0,0)和(-0.008 2,0),说明沿光轴位移载荷工况造成像点沿 -x 轴移动了 0.008 2 mm,即在像面像点有水

表 4 不同载荷时系统的 Footprint

Table 4 The footprint of system with different loads

Footprint	Static system	System with optical axis displacement loading
Left/mm	-0.147 49e-02	-0.966 40e-02
Right/mm	0.147 49e-02	-0.671 42e-02
Top/mm	0.147 49e-02	0.147 42e-02
Bottom/mm	-0.147 49e-02	-0.149 51e-02

平向左 8.2  $\mu\text{m}$  的位移量. 当像移量小于一个像元尺寸时认为可接受,则对像元尺寸大于 9  $\mu\text{m}$  的接收器,该工况像移对像面质量几乎不造成影响.

光学元件稍有微量抖动,像点点列图都会发生一定的变化. 图 4 是在光轴方向施加载荷工况对应系统的点列图(Spot Diagram),显然各视场点列图有不同程度的弥散和偏移,但各视场的像点弥散斑均在艾里斑内. 取系统中间波段参考波长为 580 nm, F 数为 10,艾里斑直径为 7.1  $\mu\text{m}$ ,所以可知该工况对像元尺寸在 8  $\mu\text{m}$  以上的像接收器都可以清晰成像,几乎不造成影响.

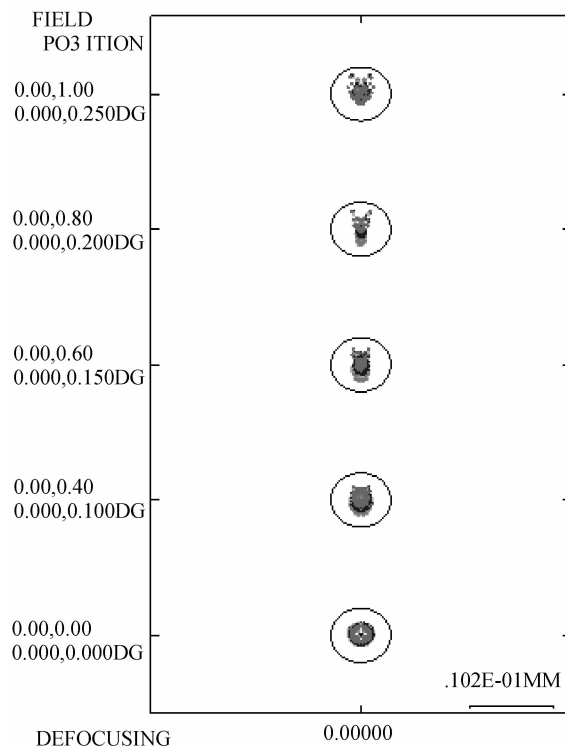


图 4 沿光轴方向振动位移载荷工况对应系统的点列图

Fig. 4 Spot diagram of system with optical axis displacement loading

调制传递函数作为系统成像全面、客观的评价指标,反映的是光学系统整体的成像效果质量. 沿光轴的微位移载荷对整个相机的 MTF 如图 5,在 40 lp/mm 分辨率时,系统的调制传递函数值在 0.6 以上. 这也与像点位移量和 RMS 点列图的结果相一致,由此可见该工况沿光轴方向平移微振动对相机成像系统的影响很小,无需隔振补偿.

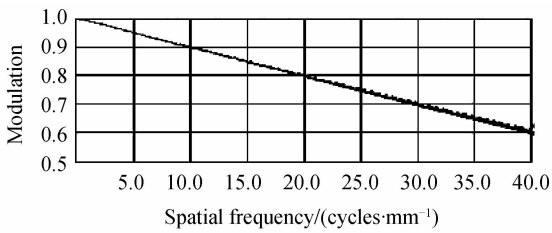


图5 光轴方向振动位移载荷工况对应系统的 MTF  
Fig. 5 Optical system MTF curve with optical axis displacement loading

### 3.2 微振动对相机成像影响的动态评价

实际相机探测器 CCD, 曝光积分时间从几毫秒到几百秒不等, 以本相机为例, 曝光积分时间长达 300 s, 仅作静态成像分析不能体现曝光积分时间内微振动对相机成像的影响, 因此研究微振动对动态成像质量影响有其必要性。

微振动伴随空间相机运行阶段是一直存在的, 所以微振动对空间相机成像影响是个动态过程。在 CCD 积分时间内, 空间干扰引起光学元件的微振动传递到像面造成像点的矢量运动。在动态光学系统中, 光学元件微振动是时变的, 像点的偏移意味着拖影模糊, 相当于静态光学系统的点列图弥散斑变大, 所以根据静态光学系统点列图均方根直径 (RMS Spot Diameter) 可以给出动态光学系统的评价指标。

调制传递函数作为评价指标, 为了得到该成像系统像面点列图弥散斑直径与调制传递函数的关系, 对该系统在 CODE V 中进行光学仿真。光学元件沿光轴即离焦变化, 主要引起像点弥散, 通过次镜不同的离焦模拟, 比较系统的弥散斑均方根与 MTF 关系, 分析结果如表 5。表中 MTF 为奈奎斯特频率  $f_N$  处对应的调制度。点列图弥散斑直径越小, 调制传递函数越大, 对成像系统影响越小, 与真实系统成像一致。一般而言, 探测器 CCD 对成像系统  $MTF \geq 0.2$  时, 才能分辨, 考虑到实际光学仪器制造、装调误差, 本相机取  $MTF = 0.3$  定义为动态光学系统调制度阈值。从表 5 可知, 该相机曝光积分时间内像移达到  $16.25 \mu\text{m}$  时, 它的调制度降为 0.3。所以任何造成系统  $16.25 \mu\text{m}$  像移的微振动干扰都是不允许的。

表 5 系统像面点列图均方根直径与 MTF 关系

Table 5 Relation between RMS spot diagram and MTF

RMS spot diagram/ $\mu\text{m}$	MTF( $f_N = 36 \text{ lp/mm}$ )
25.61	0.014
20.39	0.162
17.79	0.247
16.25	0.300
15.20	0.334
12.60	0.418

探测器曝光积分时间内, 动态成像可以看作间隔很小的静态系统连续成像。通过静态分析, 动态评价可以给出微振动对相机在轨成像影响较全面的评价。通过 Matlab 进一步仿真运算得到光学元件振动和像点运动之间的关系 (如图 6), 可以看出像点移动与反射镜的微量抖动具有线性关系。曲线的斜率反映的是成像系统对光学元件结构微振动的响应敏感度, 由于  $x$  轴和  $y$  轴关于光学系统对称, 对系统影响一致, 此处只描述关于  $x$  轴的情况。主镜和次镜分别俯仰倾斜  $0.01''$  时, 对应造成的像点  $0.42 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$  的像移量, 移动方向相反。同样方法得到光学元件在沿  $x$  轴平移微振动造成的像移量, 主镜沿  $x$  轴  $1 \mu\text{m}$  的平移微振动引起像点水平向右  $5.8 \mu\text{m}$  像移动量, 次镜则引起相反方向  $4.6 \mu\text{m}$  像移量。另外, 当主镜和次镜都沿  $x$  轴正向移动  $1 \mu\text{m}$ , 造成像点水平向右  $1.2 \mu\text{m}$  移动量, 与主、次镜单独移动造成像移量的叠加运算结果相同, 说明由微振动引起系统的像移量之间满足线性叠加。

结合动态光学系统成像评价指标, CCD 曝光积分时间内光学元件微振动量的允许像移临界值为  $16.25 \mu\text{m}$ 。根据图 6 位移响应曲线, 主镜绕  $x(y)$  轴的倾斜振动应小于  $0.4''$ , 次镜绕  $x(y)$  轴的倾斜微振动应小于  $1.7''$ ; 同理主镜沿  $x(y)$  轴的平移振动应小于  $2.8 \mu\text{m}$ , 次镜沿  $x(y)$  轴的平移振动应小于  $3.5 \mu\text{m}$ 。

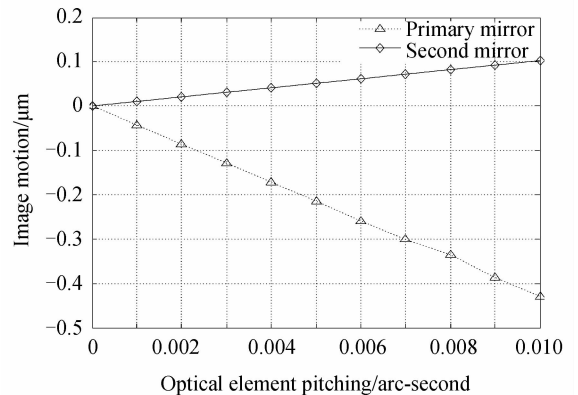


图 6 光学元件俯仰倾斜造成像移的响应曲线

Fig. 6 Image motion induced by optical elements pitching

从像移曲线可以看出, 微振动对像质影响是线性的, 而且各光学元件微振动引起的像移之间满足线性叠加。该相机光学元件俯仰和偏航倾斜对相机像质退化影响比平移振动要大得多, 沿光轴和绕光轴的微振动对其影响较小。由位移响应曲线斜率可知, 主镜机械微振动对系统成像影响比次镜严重。从主、次镜六个自由度的像移曲线斜率比较表明, 成像系统对主镜倾斜微振动最敏感。

## 4 结论

微振动对空间相机像质影响非常复杂,通过集成模型法得到各方向的复杂微振动造成该空间相机像质退化的点列图、MTF 和像点移动量. 本文采用集成模型法得到光学系统像移量,并提出动态光学系统成像评价指标,可判断微振动干扰对像质退化的贡献量. 对该相机的分析结果表明:光学系统像质退化与光学元件微振动之间满足线性关系. 光学元件沿光轴方向的微振动对相机像质影响较小,垂直光轴方向的微振动对其影响较大;系统成像质量对主镜倾斜微振动影响最敏感;CCD 曝光积分时间内,引起像移量小于  $16.25 \mu\text{m}$  的微振动干扰对成像质量影响很小,可以忽略. 上述实例应用表明集成模型法是快速求解复杂微振动造成相机像质退化量,掌握光学元件微振动影响相机像质退化敏感度的有效方法,为系统结构优化设计和隔振补偿提供有效指导.

### 参考文献

- [1] ZHANG Zhen-hua, YANG Lei, PANG Shi-wei, Jitter environment analysis for micro-precision spacecraft [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, **26**(6): 528-534.  
张振华,杨雷,庞世伟. 高准确度航天器微振动力学环境分析[J]. 航天器环境工程, 2009, **26**(6): 528-534.
- [2] CHEN Ding-yue, ZHOU Ren-kui, LI Ying-cai. Influence analysis of random vibration on TDICCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1247-1250.  
陈丁跃,周仁魁,李英才. 随机振动对星载 TDICCD 影响分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(10): 1247-1250.
- [3] TIAN Yuan, HAN Chang-yuan, ZHANG Xiao-hui, et al. Evaluation of dynamic imaging quality of space film camera [J], *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 190-196.  
田园,韩昌元,张晓辉,等. 胶片摄影空间相机的动态成像质量评价[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(2): 190-196.
- [4] HADOR O, FISHER M, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part III: numerical calculation of transfer function [J]. *Optical Engineering*, 1992, **31**(3): 581-589.
- [5] TROTT T. The effect of motion on resolution [J]. *Photogram Eng.* 1960, **26**: 819-827.
- [6] FAN Chao, LI Ying-cai, YI Hong-wei. Influence analysis of buffeting on image quality of TDICCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1714-1717.  
樊超,李英才,易红伟. 颤振对 TDICCD 相机像质的影响分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(9): 1714-1717.
- [7] XU Peng, HUANG Chang-ning, WANG Yong-tian, et al. Modulation transfer function in push-broom camera limits resulting from mechanical vibration [J]. *Journal of Astronautics*, 2003, **24**(5): 259-263.  
徐鹏,黄长宁,王涌天,等. 卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J]. 宇航学报, 2003, **24**(5): 259-263.
- [8] ZHANG Bo-wen, WANG Xiao-yong, HU Yong-li. Integrated analysis on effect of micro-vibration on high resolution space camera imaging [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(2): 60-66.  
张博文,王小勇,胡永力. 微振动对高分辨率空间相机成像影响的集成分析[J]. 航天返回与遥感, 2012, **33**(2): 60-66.
- [9] BURROUGH E L, LEE A Y. Pointing stability performance of the cassini spacecraft [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit 18-21 August 2008, Honolulu, Hawaii.
- [10] WANG Qi-zheng, SONG Wen-bing. Aerospace failure and survey of prediction and control technique of dynamic environment [J]. *Environment Technology*, 1995, **4**: 1-6.  
王其政,宋文滨. 航天事故与动力学环境预示和控制技术研究评述[J]. 环境技术, 1995, **4**: 1-6.
- [11] LIN De-luo. Analysis for vibration of side viewing mirror in satellite camera and its effect in microgravity [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2005, **1**(1): 37-43.  
林德率. 卫星相机中侧视反射镜振动及微重力环境下的影响分析[J]. 中国空间科学技术, 2005, **1**(1): 37-43.
- [12] BRAIN H, THOMAS, NEVILLE W, et al. Assessment and control of vibrations affecting large astronomical telescopes [C]. SPIE, 1987, **1732**: 130-156.