doi:10.3788/gzxb20164501.0111001

飞轮微振动对空间相机调制传递函数的影响

邓长城[1,2],安源[1],母德强[1,3],解鹏[1],于丹[4]

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,小卫星技术国家地方联合工程研究中心,长春 130033)

(2 中国科学院大学,北京 100039)

(3 长春工业大学,长春 130012)

(4 东北师范大学,长春 130024)

摘　要:结合集成建模法和光线追迹法研究飞轮微振动对相机成像质量的影响.采用集成建模法,建立飞轮微振动的扰动模型、卫星和相机的有限元模型,进行瞬态响应分析,得到 6 个方向力或力矩单独作用下相机各反射镜随时间变化的位移.采用光线追迹法,由反射镜位移和入射光线,根据折射定律计算折射后光线的位置、方向及与光轴的夹角.由得到像面处的光斑坐标和位移,运用运动统计矩计算系统调制传递函数.结果表明:响应周期与激励周期无关;激励的作用时间长度和采样时间长度均会影响调制传递函数;不同方向振动激励造成的调制传递函数变化的大小不同,而不同方向对包含原光学系统的调制传递函数的影响类似仅振动对调制传递函数的影响;当振动分别作用 My、Mz 值时衰减最大,达到 0.1 左右.该方法较理论推导简便快捷,能获取微振动与调制传递函数的关系,为系统优化设计和隔振措施提供参考.

关键词:微振动;飞轮;空间相机;集成建模;调制传递函数

中图分类号:V446+.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1004-4213(2016)01-0111001-8

Effect of Flywheel Micro-vibration on Modulation Transfer Function of Space Camera

DENG Chang-cheng[1,2], AN Yuan[1], MU De-qiang[1,3], XIE Peng[1], YU Dan[4]

(1 *National&Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)

(3 *Changchun University of Technology, Changchun* 130012, *China*)

(4 *Northeast Normal University, Changchun* 130024, *China*)

Abstract: To investigate the flywheel micro vibration effect on the camera imaging quality, the method of integrated modeling and ray tracing was used. The integrated modeling is to set up disturbance model of the micro vibration of the flywheel, the finite element model of the satellite and the camera. By the transient response analysis, the displacement of all the mirror with the time under the action of force or moment in 6 directions respectively is obtained. The ray tracing is based on reflection mirror displacement and the incident light, according to the refraction law to calculate the location and direction of the ray, and the angle between the ray and the optical axis. Then, the spot coordinates and displacements of the image plane are obtained, and the Modulation Transfer Function (MTF) of the system is calculated by using the statistical moment of motion. The results show that the response period has nothing to do with the excitation period; the length of excitation time and sampling time affect the MTF; different direction vibration causes the change of MTF of different sizes, indicating the size of angular and linear vibrations on MTF; and different direction effect on MTF is similar between with the original optical system and

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(No. 2012AA121502)资助

第一作者:邓长城(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为微振动对卫星成像质量的影响. Email:changcheng0211@163.com

导师(通讯作者):安源(1980-),男,研究员,博士,主要研究方向为空间遥感器机构和结构设计. Email: any@ciomp.ac.cn

收稿日期:2015-07-27;**录用日期**:2015-10-16

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

with only vibration, where MTF attenuation reaches maximum when My, Mz is loaded respectively, up to about 0.1. The research method is simple and fast, and the relationship between the micro vibration and the MTF is obtained, which provides reference for the system design and vibration isolation.

Key words: Micro-vibration; Flywheel; Space camera; Integrated modeling; Modulation Transfer Function(MTF)

OCIS Codes: 110.4100;130.0130;130.0250;130.3120;130.6622

0 引言

姿态控制的反作用飞轮、反作用喷气装置以及太阳帆板展开机构等[1]中的动量轮的旋转和太阳帆板驱动所产生的振动会不同程度地引起卫星星体的振动.这些振动虽然不会破坏卫星结构,但会影响航天光学遥感卫星的指向精度和指向稳定度,破坏光生电荷包的转移与焦面上图像的运动的同步性.由于具有频带较宽、振动幅值较小的特性,因此被称为微振动.微振动对成像质量的影响已经成为制约航天光学遥感技术性能提升的关键因素.

卫星姿态控制系统执行机构的反作用飞轮是卫星微振动的重要来源.飞轮微振动是由飞轮的不平衡造成的[2],表现为:1)材质不均匀、制造精度较差以及结构不对称等造成转子不平衡;2)安装不到位造成偏心而导致不平衡;3)轴弯曲和轴变形而导致不平衡;4)配合松动而导致不平衡;5)转子运行过程中旋转零件的磨损、腐蚀或介质沉积不均而导致不平衡;6)旋转零件的断裂而导致的不平衡.

衡量成像质量的一个重要指标是调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF).综合不同文献,飞轮微振动影响 MTF 的形式包括[3]:1)光学成像相机理想装调关系的改变;2)飞轮微振动对像移影响;3)卫星与光学成像相机之间的相对振动;4)飞轮微振动引起的光学系统中各个光学元件的运动.其中第 4 种情况由于会引入反射镜的径向角位移,对 MTF 产生很大影响,尤其是动态成像时更加突出,因此本文针对第 4 种情况展开研究.

由于微振动对 MTF 特性影响比较复杂,涉及飞轮微振动、结构和光学等系统[4-5].目前比较有效的处理方法是集成建模技术,即在对航天器总体性能具有重要影响的扰动、结构和载荷等分系统建模基础上,根据微振动在分系统间传递路径的物理联系,将各分系统模型进行集成,最终形成一个能全面反映各种耦合效应对航天器关键性能指标影响的系统级模型.与传统的设计和评估方法集中在单机、单学科或分系统层面不同,集成建模可提供系统级综合性能评估和误差分析手段,并从系统级层面指导设计.本文将集成建模技术与光线追迹法结合起来研究,分析微振动对 MTF 的影响.

1 卫星和相机的集成建模

卫星和相机整体的建模[7-8]包括飞轮建模、光学相机和卫星平台建模、基于光线追迹的光学建模,流程如图 1.

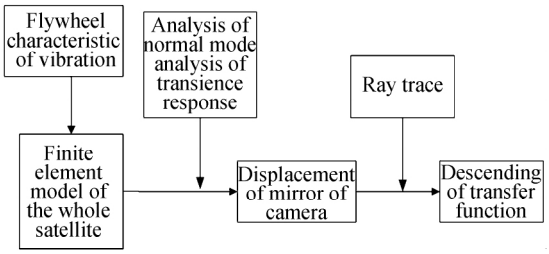


图 1 集成建模示意图

Fig. 1 Integrated Modeling schematic

1.1 飞轮微振动建模

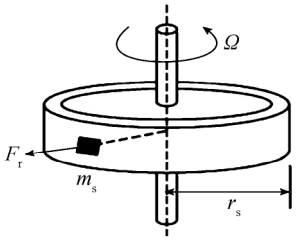
飞轮的微振动是由飞轮的静不平衡和动不平衡引起的,如图 2.静不平衡是指飞轮转子质心偏离其旋转轴,可将转子看作两部分:严格轴对称部分和距飞轮转轴 r_s 处的点质量 m_s;F 为转子旋转的惯性力.动不平衡指转子质量分布不均导致其惯量积不为 0,可将转子分为两部分:严格对称部分和 2 个沿轴向方向距离为 h 的点质量 m_d,2 个点质量的连线同转轴共面,距离转轴为 r_d.转子旋转时,点质量 m_s 受到的向心力为

$$F=U_s\Omega^2 \tag{1}$$

2 个点质量 m_d 旋转产生的力矩为

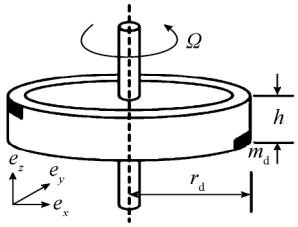
$$T=U_d\Omega^2 \tag{2}$$

式中 $U_s=m_s r_s$ 为静不平衡量,$U_d=m_d r_d h$ 为动不平衡量,Ω 为角速度.在引言中飞轮微振动的影响因素中,第 1)、2)条影响静不平衡,其余各条影响动不平衡.飞轮转子静动不平衡产生的力和力矩与转子转速同频率,近似为正弦波[7,9].经分析测试,飞轮扰动产生的力为 10N、力矩为 10Nm,作为瞬态分析中的输入激励.



(a) Static unbalance flywheel schematic

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(b) Dynamic unbalance flywheel schematic

图 2　飞轮不平衡示意图

Fig. 2　Unbalance flywheel schematic

飞轮微振动对相机反射镜的影响包括

1）光学成像相机反射镜位移的变化

微振动导致光学元件之间的相对位置发生变化，改变了光学元件之间理想装调关系，光学成像相机视轴改变，导致物点的成像位置和系统像差的变化，影响成像质量. 微振动是一个动态过程，光学元件之间的相对位置的变化也是时变的. 所以，光学元件之间相对位置的变化对成像质量的影响也是随着时间的不同而变化的.

2）光学元件反射面的面形变化

由于微振动的存在，光学元件的面形发生变化，直接影响成像质量，且微振动造成的面形变化也是时变的，然而，卫星的微振动干扰造成的光学元件面形的变化非常小，可忽略不计[10-11]，因此本文重点关注相机反射镜位移变化的影响.

3）曝光时间内像点的移动

理想光学系统中，物点成像为一个像点，若光学系统或光学元件发生微振动，根据几何光学知识可知，这个物点在像面上的成像位置必将发生变化，也就是物点将在几个位置成像，使得本应聚集在一点的能量分布在几个点上，造成光强幅值下降，而光的分布范围扩大，成像对比度和分辨力降低.

1.2　相机和卫星平台结构模型

相机和卫星有限元力学模型是系统动力学分析（模态分析和瞬态分析）的基础. 将卫星平台作为相机安装板，安装板直径 Φ 为 1020 mm，厚度为 40 mm，外接套筒直径 Φ1020 mm，外筒高度为 150 mm，壁厚 30 mm，是小平台. 飞轮安装在相机相对的一端. 飞轮振动依次通过安装板、相机支腿传递到相机上，如图 3. 利用有限元法建立相机结构的动力学模型[10-11]为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{F} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 为 $N\times N$ 维矩阵，分别表示质量、阻尼和刚度；$\boldsymbol{F}$ 为作用力（是矢量，式(1)中 F 为其大小）；$\boldsymbol{x}$ 为位移响应. 引入模态变换 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{\Phi q}$（$\boldsymbol{\Phi}$ 为 $N\times N$ 为振型矩阵，$\boldsymbol{q}$ 为模态坐标）将物理坐标转换为模态坐标，对式(3)解耦，得到模态空间方程

$$\ddot{\boldsymbol{q}}+2\boldsymbol{Z\Omega}\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{\Omega}^2\boldsymbol{q}=\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F} \tag{4}$$

假设保留前 r 阶模态（其中忽略刚体平动的 3 个模态），$\boldsymbol{q}\in\boldsymbol{R}^r$ 是模态坐标；$\boldsymbol{Z}\in\boldsymbol{R}^{r\times r}$ 是对角阻尼阵；$\boldsymbol{\Phi}\in\boldsymbol{R}^{n\times r}$ 是质量归一化模态阵；$\boldsymbol{\Omega}\in\boldsymbol{R}^{r\times r}$ 是对角固有频率阵. 式(4)改为状态空间方程，即

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}_p\\ \boldsymbol{z}\\ \boldsymbol{y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_p & \boldsymbol{B}_w & \boldsymbol{B}_u\\ \boldsymbol{C}_z & \boldsymbol{D}_{zw} & \boldsymbol{D}_{zu}\\ \boldsymbol{C}_y & \boldsymbol{D}_{yw} & \boldsymbol{D}_{yu}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_p\\ \boldsymbol{w}\\ \boldsymbol{u}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{x}_p=[\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{w},\boldsymbol{u}\subset\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{w}\in\boldsymbol{R}^{n_w}$、$\boldsymbol{u}\in\boldsymbol{R}^{n_u}$，$\boldsymbol{w}$ 是扰动输入，$\boldsymbol{u}$ 是控制输入；$\boldsymbol{z}\in\boldsymbol{R}^{n_z}$ 是相机镜面响应输出；$\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{R}^{n_y}$ 是控制测量输出. 系统矩阵为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_p & \boldsymbol{B}_w & \boldsymbol{B}_u\\ \boldsymbol{C}_z & \boldsymbol{D}_{zw} & \boldsymbol{D}_{zu}\\ \boldsymbol{C}_y & \boldsymbol{D}_{yw} & \boldsymbol{D}_{yu}\end{bmatrix}=\left[\begin{array}{cc:c:c}0 & \boldsymbol{I} & 0 & 0\\ -\boldsymbol{\Omega}^2 & -2\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}_w & \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\beta}_u\\ \hdashline \multicolumn{2}{c:}{\boldsymbol{\Phi\beta}_z} & 0 & 0\\ \hdashline \multicolumn{2}{c:}{\boldsymbol{\Phi\beta}_y} & 0 & 0\end{array}\right] \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{\beta}_w$、$\boldsymbol{\beta}_u$、$\boldsymbol{\beta}_z$、$\boldsymbol{\beta}_y$ 是对模态矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 的选择矩阵.

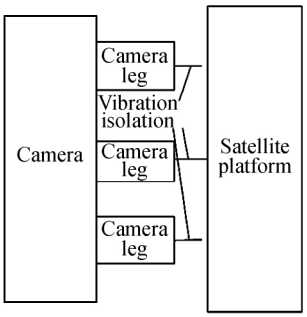


图 3　相机和卫星平台有限元建模示意图

Fig. 3　Finite element modeling schematic of cameras and satellite platforms

本文相机参数为：焦距 $f=8$ mm；F 数 $F=13.3$；波长 500 nm～800 nm. 相机和卫星有限元坐标系中，光轴方向为 x 轴，右手坐标系确定 y、z 轴. 飞轮坐标系旋转轴为 z 轴，右手坐标系确定 x、y 轴.

采用 MSC. Patran/Nastran 软件完成空间相机的有限元建模，并进行材料和单元属性的定义. 卫星和相机模型有 134597 个结点，95751 个单元. 相机和卫星平台之间用金属橡胶隔振器连接，其弹性模量为 1Gpa，泊松比为 0.3，阻尼为 0.08，密度为 1700Kg/m^3. 有限元将其等效为杆单元处理. 由于隔振器的存在使得相机和卫星平台的基频较低，如图 3.

1.3　姿态控制

姿态控制可以使卫星平稳运行，但是姿态控制不能抑制飞轮微振动，因此微振动能在姿态控制环内传递. 具有状态空间形式的姿态控制模型[12]为

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}_k\\ \boldsymbol{u}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_k & \boldsymbol{B}_k\\ \boldsymbol{C}_k & \boldsymbol{D}_k\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_k\\ \boldsymbol{y}\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：$x_k\in\mathrm{R}^{n_k}$ 是控制器状态. 式(7)含有控制律、传感器和执行机构模型. 从含有控制闭环的干扰到相机镜面响应的通道表示为

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}_c\\ \boldsymbol{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_c & \boldsymbol{B}_{c,w}\\ \boldsymbol{C}_{c,z} & \boldsymbol{D}_{c,zw}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_c\\ \boldsymbol{w}\end{bmatrix} \tag{8}$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中闭环状态 $x_c=[x_p,x_k]^{\mathrm{T}}$.

1.4 光线追迹法

采用光线追迹法建立光路传输模型，首先要求出镜面产生失调后(即振动后)的位置. 借助运动学概念，每一个镜面分别用镜面坐标系 $o_m x_m y_m z_m$ 和牵连坐标系 $oxyz$ 来描述镜面位置[13]. 当光学系统未受到振动时，镜面坐标系和牵连坐标系相互重合，即牵连坐标系是镜面坐标系的理想位置. 当施加振动时，镜面产生失调，镜面坐标系与牵连坐标系分离，镜面坐标系随镜面运动，而牵连坐标系与基础(施加振动的区域)有相同的运动. 只考虑光线以反射形式传输，以抛物面说明镜面失调. 镜面在镜面坐标系中方程为

$$2pz_m=x_m^2+y_m^2 \tag{9}$$

参考牵连坐标系描述光路传输，通过两次坐标旋转和坐标平移求出失调镜面相对于牵连坐标系的表达式. 取镜体上下面中心两个特征点(如图 4)，即点 1、点 2(由于点 1、2 都为面中心点，故 1、2 连线是光轴，可以描述反射镜的位移). 点 1 为镜面坐标系原点，1、2 两点连线方向为坐标轴 z_m 方向. 当点 1 位置和 1，2 两点连线方向确定后便可得出失调镜面位置，由于抛物面是旋转面，无需考虑镜面绕中心转动的位置.

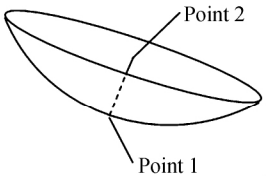


图 4 镜面特征点

Fig. 4 Key points of mirror

由文献[14]可得失调镜面方程为

$$F(x,y,z)=2p((x-\Delta x_1)\sin\beta+\cos\beta((z-\Delta z_1)\cos\alpha+(y-\Delta y_1)\sin\alpha))-((x-\Delta x_1)\cos\beta-\sin\beta((z-\Delta z_1)\cdot\cos\alpha+(y-\Delta y_1)\sin\alpha))^2-((y-\Delta y_1)\cos\alpha-(z-\Delta z_1)\sin\alpha)^2=0 \tag{10}$$

式中：α 为第一步中坐标系 $oxyz$ 绕 x 轴的转动角，得坐标系 $ox'y'z'$；β 为第二步中坐标系 $ox'y'z'$ 绕 y' 的转动角；$(\Delta x_1,\Delta y_1,\Delta z_1)$ 为 1 点失调位移；$(\Delta x_2,\Delta y_2,\Delta z_2)$ 为点 2 失调位移. 若

$$\begin{cases} a=\Delta x_2-\Delta x_1 \\ b=\Delta y_2-\Delta x_1 \\ c=\Delta z_2-\Delta x_1 \end{cases} \tag{11}$$

则

$$\begin{cases} \sin\alpha=\dfrac{b}{\sqrt{b^2+c^2}} \\ \sin\beta=\dfrac{a}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \end{cases} \tag{12}$$

光线追迹法在单个失调反射镜面上的应用如图 5，当给出点 1 点 2 失调位移和入射光线方程后，利用 Matlab 求根函数可得出失调镜面与入射光线交点，随后用矢量形式的反射定律求出反射光线的方向矢量，从而得出反射光线与光轴夹角.

光线追迹法建立单个失调镜面光路传输具体步骤为

1)坐标变换求出失调后镜面方程

$F(x,y,z)=0$；

2)求出入射光线与失调镜面交点：(x_c,y_c,z_c)，入射光线方程为

$$\frac{x-x_{c-1}}{\boldsymbol{I}_x}=\frac{y-y_{c-1}}{\boldsymbol{I}_y}=\frac{z-z_{c-1}}{\boldsymbol{I}_z} \tag{13}$$

式中：$I=\{I_x,I_y,I_z\}$，为入射光线方向矢量；

3)求出交点 (x_c,y_c,z_c) 处镜面的法向量 $\boldsymbol{N}=\{\frac{\partial F}{\partial x},\frac{\partial F}{\partial x},\frac{\partial F}{\partial z}\}$，将 $\boldsymbol{N}$ 单位化得 $\boldsymbol{n}=\frac{\boldsymbol{N}}{|\boldsymbol{N}|}$；

4)利用矢量形式的光线反射公式求出反射光线方向矢量 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{I}-2\boldsymbol{n}(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{I})$[15]，其中 $\boldsymbol{R}=\{R_x,R_y,R_z\}$ 为反射光线方向矢量，$\boldsymbol{n}$ 为交点处镜面的单位法向量，反射光线方程为

$$\frac{x-x_c}{R_x}=\frac{y-y_c}{R_y}=\frac{z-z_c}{R_z} \tag{14}$$

5)求出反射光线与光轴的夹角 $\theta=\arccos\frac{\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{n}_z}{|\boldsymbol{R}|\,|\boldsymbol{n}_z|}$，其中 $n_z=\{0,0,-1\}$.

由于反射光线向下，取垂直向下方向与其求夹角，并将反射光线投影到 xy 平面，求出投影线与 x 轴夹角 γ. 光线追迹法运用到多个反射镜面的失调光学系统时，只需将该五个步骤按光线传输方向依次应用到各个失调镜面即可.

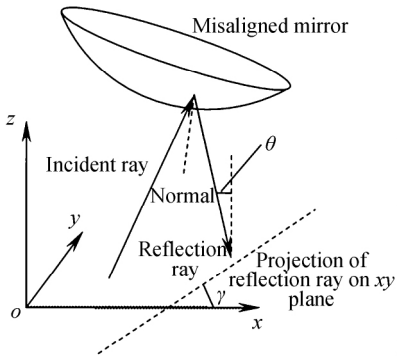


图 5 光线被失调后镜面反射

Fig. 5 Ray reflected by the misaligned mirror

2 仿真分析

通过对相机和卫星平台的模态分析获取基频，依此频率设置瞬态分析的激励频率，因为此时响应最大. 得到各反射镜在不同工况下随时间变化的位移，然后通过光线追迹法计算 MTF.

2.1 模态分析

模态分析[11-12,16]能够确定相机的动态特性，即提

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

供给定阶数的固有频率和振型，以此考察相机的动态刚度，评估其动力学特性，是其他动力学响应分析（如瞬态分析）的基础，通过模态分析了解结构刚度上的薄弱环节进行设计的评估和优化. 卫星和相机整体前几阶模态以及各阶模态振型组成见表 1.

表 1　模态和振型

Table 1　Mode and vibration shapes

Modal order	Frequency/Hz	Shapes (X axis)
1	41.27	Jigging motion in YZ plane
2	42.4	Symmetrical Jigging motion in YZ plane
3	55.79	Jigging motion in X axis
5	103.2	Satellite platform bottom torsion

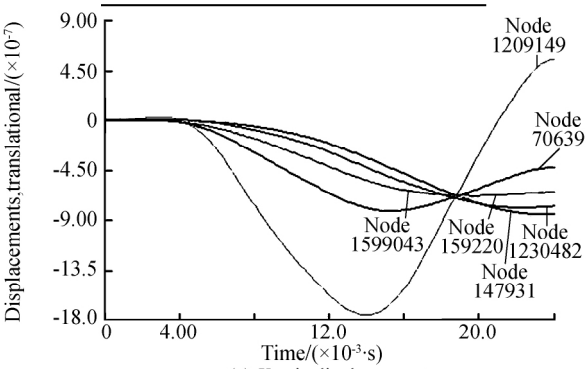
2.2　瞬态响应分析

瞬态响应分析同样分别对沿 X、Y、Z 轴和绕 X、Y、Z 轴 6 个方向的工况进行加载激励，加载位置在卫星平台底板飞轮安装处. 力的大小为 10 N，力矩大小为 10 Nm，频率均为 41.27 Hz（对应一阶模态位移最大）. 本文相机飞轮产生的作用力量级为 10 N 或力矩量级为 10 Nm，原因是：当力为 1 N 或力矩为 1 Nm 时，算得 MTF 的改变很小，可忽略；而力 100 N 或力矩 100 Nm 时，MTF 严重衰减，该工况下相机成像非常模糊. 为使瞬态分析的工况具有普遍意义，当力或力矩为任意值，将该值除以 10 再乘以 10 N 或 10 Nm 的位移结果即可得到任意值的结果（系统视作线性系统），但对于不同的相机激励不同. 在采样时间内对各位置点采样，激励作用时间为 0.024 s、采样时间 0.024 s 时，得到加载 X 向力 10 N 后各个反射镜的 Y 向和 Z 向位移响应曲线如图 6. 各结点含义见表 2. 其他方向作用力或力矩时可以分别计算分析获取.

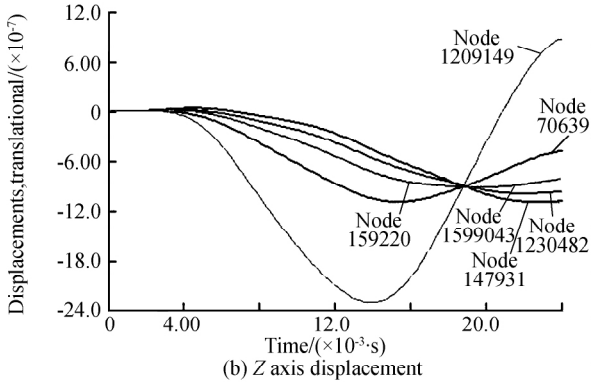
表 2　各结点含义

Table 2　Meaning of node

Node	Mirror
70639	Primary mirror
147931	Focal plane
159220	Folding mirror
1209149	Second mirror
1230482	Focusing mirror
1599043	Third mirror



(a) Y axis displacement



(b) Z axis displacement

图 6　沿 X 轴加载 10N 力的位移

Fig. 6　Displacement response of X axis with force 10N

分析表明：输出位移响应都近似正弦波，周期与输入激励的周期无关. 最大峰值出现在次镜上，最大值为 12μm. 在设计中，次镜的瞬态响应需要特别关注.

2.3　像质的评价和 MTF 的计算

对空间相机的成像质量评价方法[17]有主观评价法和客观评价法. 主观评价方法最准确、最可靠的，但是评价过程非常费时，需要特定的评价环境，评价结果易受评价环境、评价人员背景和评价时情绪的影响，评价结果不可重复，实际上不能客观反映图像质量. 客观评价法根据对原始图像的依赖程度，将图像质量评价方法分为全参考型（Full Referenee，FR）、部分参考型（Redueed Refer-ence，RR）和无参考型（No Reference，NR）三类. 全参考型图像质量评价法可以分为基于像素误差（Pixel-based Error）的评价方法、基于误差敏感性（Error Sensitivity）的评价方法和基于结构相似度（Structural Similarity）的评价方法. 其中，基于像素误差法中的计算均方差法（Mean Square Error，MSE）和峰值信噪比（Peak signal Noise Ratio，PSNR）方较为常用. 这两种方法采用简单的计算模型量化了原始图像与待评价图像之间每个像素点的差异，但不能真实反映视觉感知的质量，评价准确性较差. 随着光学传递函数理论和测试技术的不断成熟，MTF 已成为各种光学系统像质评价的重要依据.

对于线性光学系统[18]，亮度按空间频率 ν 的正弦规律 $I_{\text{object}}(x)$ 变化的物体，经光学成像后，图像亮度按空间频率 ν 的正弦形式 $I_{\text{image}}(x)$ 变化，但对比度会下降. 对比度或称为调制度定义为归一化的图像最大亮度差，即

$$k=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}} \tag{15}$$

光学系统的调制传递函数为空间频率 ν 的实值函数

$$\text{MTF}(\upsilon)=\frac{k_{\text{imag}}(\upsilon)}{k_{\text{object}}(\upsilon)} \tag{16}$$

将曝光时间内主镜、次镜、三镜、折叠镜、调焦镜、

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

像面在 Y、Z 方向(有限元中的方向,X 为光轴方向)的位移量导入 Matlab 程序,再将每次采样的振动数据通过动态链接发送至 ZEMAX,加载振动信息后通过光线追迹得到该采样时刻的像面光斑位移量,重复积分时间内的每次采样数据,得到曝光时间内(视场和地物驻留时间对成像影响不大,具体影响不在本文讨论内容)像面处光斑像移量采样值,该像移量采样值为振动产生的像移的概率分布样本. 利用 OTF 计算公式(式(17))及 N 阶统计矩计算公式(式(18))可得到受振动影响的成像 MTF[19-20],流程图如图 7,X 方向作用 10N 力的结果如图 8.

$$\mathrm{OTF}(\omega)=\sum_{n=0}^{\infty}\frac{m_n}{n!}(-\mathrm{j}\omega)^n \tag{17}$$

$$m_n^x=\frac{1}{S}\sum_{i=1}^{s}x_i^n \tag{18}$$

式中:OTF 为光学传递函数;$\{x_i\}(i=1,2,3,\cdots,S)$ 为采样序列;m_n^x 为运动的 N 阶统计矩.

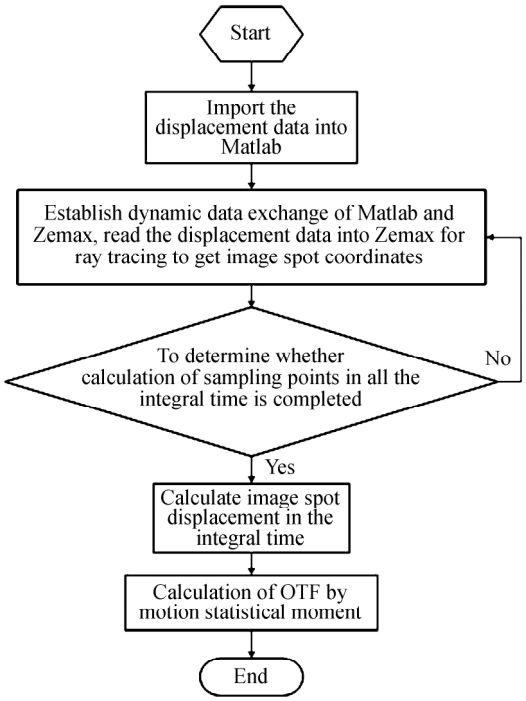
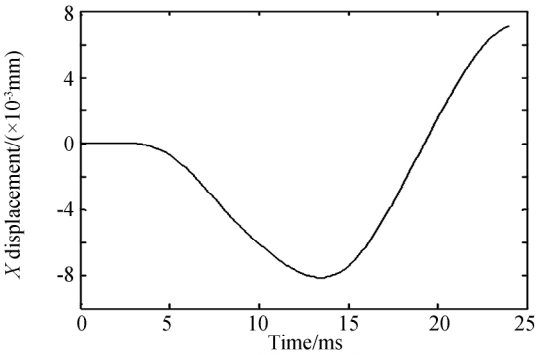
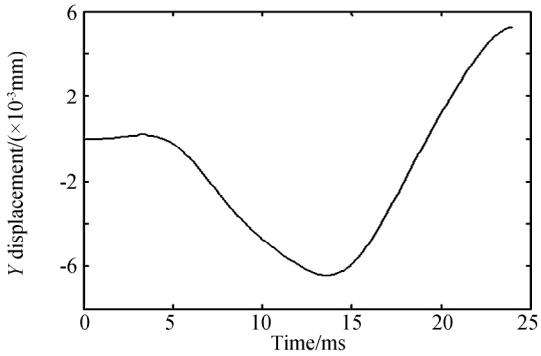


图 7 MTF 计算流程

Fig. 7 Flowchart of MTF calculation



(a) Along X axis

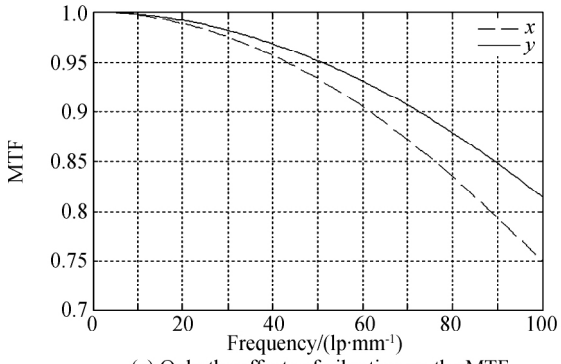


(b) Along Y axis

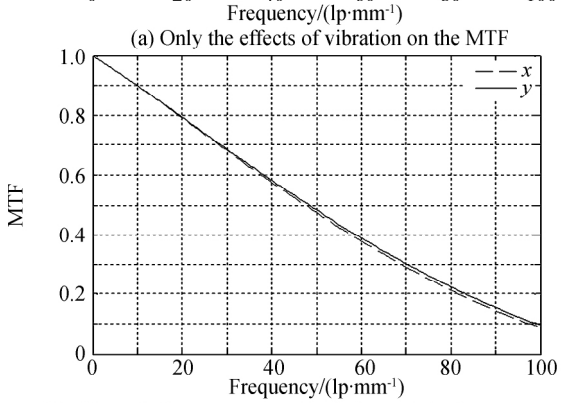
图 8 焦面上光斑位移

Fig. 8 Spot displacement in focal plane

由图 8 可以看出 $F_x=10\mathrm{N}$ 时两个方向的焦面光斑位移响应趋势差不多,只是幅值有差异. 图形与输入激励不同,但趋势相同,响应与输入激励有相似性. 图 9(a)为仅振动对 MTF 的影响.



(a) Only the effects of vibration on the MTF



(b) Effect of vibration on MTF including original optic system

图 9 振动对 MTF 的影响

Fig. 9 Effect of vibration on MTF

为确定加入激励时间长短对最后 MTF 的影响,对工况加载 X 方向外力 10N 时,分别设置 3 种工况:1)激励作用时间 0.024s、采样时间 0.024s,2)激励作用时间 0.006s、采样时间 0.006s,3)激励作用时间 0.006s、

表 3 激励作用时间和采样时间对 MTF 的影响

Table 3 Effect of loading time and the sampling time of the MTF

Case	(1)	(2)	(3)
X	0.92	0.9875	0.90
Y	0.93	0.9975	0.94

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

采样时间 0.024. 0.024s 是取激励频率为 41.27Hz 的一个整周期，0.006s 是 1/4 周期，激励在该时间段内单调，考察激励和响应的关系. 加激励 $F_x=10$N 的振动得到奈奎斯特处的 MTF 如表 3.

对于 6 个方向分别加载后的振动对 MTF 的影响结果如表 4.

表 4　不同方向激励对 MTF 的影响

Table 4　Effect on MTF of different direction load

Frequency location	Direction	F_x(10N)	F_y(10N)	F_z(10N)	M_x(10Nm)	M_y(10Nm)	M_z(10Nm)
Nyquist frequency	X axis	0.92	0.99	0.81	0.94	0.22	0.80
57lp/mm	Y axis	0.94	0.87	0.99	0.97	0.84	0.20

作用力 $Fx=10$N 时包含原光学系统对 MTF 的影响如图 9(b). 作用 6 个方向激励的结果如表 5.

表 5　包含原光学系统不同方向激励对 MTF 的影响

Table 5　Effect on MTF of different direction load including original optic system

Frequency location	Direction	F_x(10N)	F_y(10N)	F_z(10N)	M_x(10Nm)	M_y(10Nm)	M_z(10Nm)
Nyquist frequency	X axis	0.38	0.42	0.36	0.42	0.10	0.35
57lp/mm	Y axis	0.40	0.39	0.44	0.43	0.36	0.09

3　结论

通过模态分析，得到一阶模态为 41.27Hz. 然后以此频率为输入激励进行瞬态分析，计算 MTF. 结果表明：

1)激励作用一周期而焦面光斑上的振动不一定表现出周期性特征. 激励周期不能决定响应周期.

2)激励作用时间 0.024 s、采样时间 0.024 s 比激励作用时间 0.006 s、采样时间 0.006 sMTF 衰减大，说明虽然是周期激励但是前者引起的位移较大，导致 MTF 衰减大. 当激励作用时间 0.006 s、采样时间 0.024 s，一方面激励作用时间短，MTF 衰减小；另一方面采样时间长，偏离运动时间长，MTF 衰减大. 最后使得 MTF 的衰减量不稳定，比激励作用时间 0.006 s、采样时间 0.006 s 小.

3)作用轴向激励时，两个方向都有衰减，但是数值不大. 作用径向力时，作用力方向上的衰减大，另一方向衰减小. 作用径向力矩时，非作用力矩方向上衰减最大，降低到 0.2 左右，作用力矩方向上也衰减到 0.8. 径向激励比轴向激励影响大，角振动比线振动影响大.

4)包含原光学系统的 MTF 的变化与仅振动作用的 MTF 的变化一致. 作用径向力矩时衰减最大，达到 0.1 左右. 其余衰减较小. 表明基于光线追迹的集成建模方法是简便获取飞微振动对 MTF 影响的有效方法，也可以计算其他复杂微振动，为以后的隔振减振设计提供参考.

参考文献

[1] DENG Qin. Research on image degradation due to satellite platform vibration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
邓勤. 卫星颤振对遥感成像质量影响研究及实验验证[D]. 杭州：浙江大学，2013.

[2] YANG Jian. Research of reaction wheel disturbance vibration technology of satellite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
阳剑. 针对飞轮扰动的卫星减振技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.

[3] WANG Jun. Evaluation and optimizatin on dynamic imaging quality of an optical remote sensor [D]. ChangChun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2000.
王俊. 航天光学成像遥感器动态成像质量评价与优化[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2000.

[4] GE Dong-ming, ZOU Yuan-jie. Integrated modeling and micro-vibration analysis of structure control optics of high resolution satellite[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, **30**(6): 586-590.
葛东明，邹元杰. 高分辨率卫星结构-控制-光学一体化建模与微振动响应分析[J]. 航天器环境工程，2013，**30**(6)：586-590.

[5] MIKE L. Space-based optical system performance evaluation with integrated modeling tools[C]. SPIE, 2004, **5420**: 85-96.

[6] PANG Shi-wei, YANG Lei, QU Guang-ji. New development of micro vibration integrated modeling and assessment technology for high performance spacecraft[J]. *Structure & Enviroment Engineeering*, 2007, **34**(6): 1-9.
庞世伟，杨雷，曲广吉. 高精度航天器微振动建模与评估技术最近进展[J]. 强度与环境，2007，34(6)：1-9.

[7] OLIVIER L, WECK D, DAVID W, *et al*. Integrated modeling and dynamics simulation for the next generation space telescope (NGST)[C]. SPIE, 2000, **4013**: 920-922.

[8] QIAN Yi-xian, LIANG Wei, GAO Xiao-dong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function for high resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 192-196.
钱义先，梁伟，高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. 光学学报，2009，**29**(1)：192-196.

[9] ELIAS L M, DEKENS F, BAS-DOGAN I, *et al*. A methodology for "modeling" the mech-anical interaction between a reaction wheel and a flexible structure[C]. SPIE, 2003, **4852**: 541-555.

[10] LEE D, YOON J, HAN J. Development of integrated simulation tool for jitter ana-lysis[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2012, **13**(1): 64-73.

[11] ZHANG Bo-wen, WANG Xiao-yong, HU Yong-li. Integrated analysis on effect of micro-vibration on high resolution space camera imaging[J]. *Spacecraft Reco-very & 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.

[12] LIU Yan-li, CAO Dong-jing. Analysis method on effect of jitter on high resolution agile satellite imaging[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, **35**(2): 46-53.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

刘彦丽,曹东晶.高分辨率敏捷卫星颤振对成像的影响分析方法[J].航天返回与遥感,2014,**35**(2):46-53.

[13] SONG Wen-chao. Computation and simulation of misaligned optical system in vibration environment by using quaternion method [D]. Xi'an:Xidian University,2007:22-23.
宋文超. 振动失调光学系统的四元数计算方法与仿真 [D]. 西安:西安电子科技大学,2007:22-23.

[14] SHEN Dong-fu, LIU Shun-fa, HU Hong-yi. Simulation of ray tracing in misaligned optical system under mechanical vibration[J]. *Optic-Electronic Engineering*, 2013, **40**(4): 52-58.
沈东富,刘顺发,扈弘毅. 振动失调下光学系统光线追迹仿真计算[J].光电工程,2013,**40**(4):52-58.

[15] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2004.

[16] WANG Hong-juan, WANG Wei, WANG Xin, *et al*. Space cemera imag degradation induced by satellite microvibr-ation [J]. *Acta Photonica Sinica*,2013,**42**(10):1212-1217.
王红娟,王炜,王欣,等.航天器微振动对空间相机像质的影响[J].光子学报,2013,**42**(10):1212-1217.

[17] ZHUANG Hua. Research on image quality assessment based on visual perception[D]. Hangzhou: Zhejiang Univer-sity, 2009:6-22.
张桦.基于视觉感知的图像质量评价方法研究[D].杭州:浙江大学,2009:6-22.

[18] GUAN Xin. Integrated design of vibration isolation and attitude control for high resolution remote sensing satellites [D]. Beijing:Tsinghua University,2012:33-34.
关新. 高分辨率遥感卫星隔振与姿态控制一体化设计[D].北京:清华大学,2012:33-34.

[19] ZHANG Ying. Imaging MTF of space cam-era under vibration and simulation[J]. *Optics and Precision Engineering*,2011,**19**(9):2146-2153.
张影.空间相机的颤振成像调制传递函数及仿真实验[J].光学精密工程,2011,**19**(9):2146-2153.

[20] GENG Wen-bao, ZHAI Lin-pei, DING Ya-lin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*,2009,**17**(2): 314-320.
耿文豹,翟林培,丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J].光学 精密工程,2009,**17**(2):314-320.

Foundation item: The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2012AA121502)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net