

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

葛东明, 邹元杰

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 文章针对高分辨率遥感卫星的微振动分析, 给出了一种结构-控制-光学一体化建模方法: 将微振动干扰源模型、整星结构模型、控制系统模型和光学系统模型按照实际的物理联系连接为一个整体, 进而预测空间相机在轨微振动的像移响应和干扰源到像移的传递特性。以某遥感卫星为例, 将其微振动下的像移响应和传递特性与工程中的其他处理方法的计算结果进行了对比分析。研究结果表明: 一体化建模分析方法从原理上更接近卫星在轨实际工作情况, 能够给出较为合理的微振动分析结果; 其他工程处理方法的分析结果均与一体化建模分析方法有差异, 使用时应根据设计和分析的具体目的与条件恰当选择。

关键词: 卫星; 微振动; 一体化建模; 像移

中图分类号: V474.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2013)06-0586-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.06.004

0 引言

微振动是指航天器在轨运行期间, 由于运动部件的周期性或准周期性工作而引起的航天器局部或整体的微幅、宽频、不造成结构破坏但影响有效载荷性能的一种特殊振动现象。微振动源主要是航天器的运动部件, 如姿态控制执行机构(飞轮、控制力矩陀螺)、驱动机构(太阳能电池阵驱动机构、天线驱动机构)等, 其产生的扰动频率范围从 0 Hz 到上千 Hz, 其中 5~200 Hz 范围内的微振动对有效载荷的影响最大。微振动既会使卫星发生整体的姿态晃动, 也会激发星体及空间相机成像元件的结构振动, 产生视线抖动和像移, 从而降低成像质量和分辨率, 是高精度航天器研制必须解决的关键技术之一^[1-3]。

微振动对有效载荷的特性影响比较复杂, 涉及结构、控制和光学等系统。目前比较有效的分析手段是一体化建模技术, 指在对航天器总体性能具有重要影响的结构、控制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

动态输入输出数学模型。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, 一体化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。目前, 比较成熟的一体化建模系统通用软件有美国喷气推进实验室(JPL)的IMOS(Integrated Modeling of Optical Systems)^[4]、麻省理工学院(MIT)的DOCS(Disturbance-Optics-Controls-Structures)^[5]和NASA的IME(Integrated Modeling Environment)^[6]等, 并在SIM^[7]、JWST^[8]、TPF^[9]等高分辨率空间望远镜的研制中取得了成功应用。与国外相比, 我国的微振动分析还处于子系统级, 例如卫星结构响应分析、相机系统成像质量评价以及不带控制闭环的问题分析等^[10-12], 这种拆分开分析方法必然与系统级的建模分析结果存在差异。文献[13]介绍了考虑结构-控制-光学耦合的建模方法, 但尚未在国内公开文献中见到基于整星级一体化建模的仿真工程应用案例和对比分析结果。

本文采用一体化建模思路, 在文献[14]的研究工作基础上给出了一种基于某高分辨率遥感卫星全柔性模型的结构-控制-光学耦合的微振动建模方法, 以微振动源作为输入, 将结构模型与控制系

收稿日期: 2013-07-26; 修回日期: 2013-08-09

作者简介: 葛东明(1982—), 男, 博士学位, 从事航天器动力学与控制的研究。E-mail: gedm1982@gmail.com。

统模型闭环连接,利用光学系统模型中的灵敏度矩阵将相机镜面的振动响应映射到反映图像质量的像移,分析从微振动源到光学系统像移的微振动响应和传递特性,并与子系统级建模的分析方法进行了对比研究。

1 结构-控制-光学一体化建模方法

基于有限元方法建立的航天器结构动力学方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F, \quad (1)$$

式中: $M \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 是质量矩阵; $C \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 是阻尼矩阵; $K \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 是刚度矩阵; $F \in \mathbf{R}^n$, 是输入载荷; $x \in \mathbf{R}^n$, 是节点位移。

利用模态叠加法,同时设阻尼为模态阻尼形式,将方程(1)解耦成模态空间方程

$$\ddot{q} + 2Z\Omega\dot{q} + \Omega^2q = \Phi^T F. \quad (2)$$

假设保留前 r 阶模态(其中刚体模态不考虑平动的3个模态), $q \in \mathbf{R}^r$, 是模态坐标; $Z \in \mathbf{R}^{r \times r}$, 是对角阻尼矩阵; $\Omega \in \mathbf{R}^{r \times r}$, 是对角固有频率矩阵; $\Phi \in \mathbf{R}^{n \times r}$, 是质量归一化模态矩阵。将方程(2)描写为状态空间形式

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & B_w & B_u \\ C_z & D_{zw} & D_{zu} \\ C_y & D_{yw} & D_{yu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ w \\ u \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} A_c & B_{c,w} \\ C_{c,z} & D_{c,zw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p + B_u D_k C_y & B_u C_k & B_w + B_u D_k D_{yw} \\ B_k C_y & A_k & B_k D_{yw} \\ C_z + D_{zu} D_k C_y & D_{zu} C_k & D_{zw} + D_{zu} D_k D_{yw} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于光学系统,微振动条件下镜面之间的相对运动是微小的,可以采用光学系统一阶特性将镜面振动响应映射到像移响应,即

$$\Delta d = Sz, \quad (8)$$

其中: $S \in \mathbf{R}^{2 \times n_z}$, 为光学系统灵敏度矩阵; $\Delta d = [\Delta x, \Delta y]^T$, 为微振动在相机焦平面两个方向的像移。

那么,由式(6)和式(8),干扰到像移响应的通道可采用如下方式实现:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \Delta d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_c & B_{c,w} \\ SC_{c,z} & SD_{c,zw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ w \end{bmatrix}. \quad (9)$$

从方程(9)可以进行时域闭环仿真,得到干扰源作用下的像移响应。为了得到频域响应,对式(9)进行拉氏变换即可得到从干扰输入到像移输出的传

递特性: 状态向量 $x_p = [q, \dot{q}]^T$; $w \in F$, $w \in \mathbf{R}^{n_w}$, 是干扰输入; $u \in F$, $u \in \mathbf{R}^{n_u}$, 是控制输入; $z \in \mathbf{R}^{n_z}$, 是相机镜面响应输出; $y \in \mathbf{R}^{n_y}$, 是控制量测量输出。系统矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} A_p & B_w & B_u \\ C_z & D_{zw} & D_{zu} \\ C_y & D_{yw} & D_{yu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ -\Omega^2 & -2Z & \Phi^T \beta_w & \Phi^T \beta_u \\ \Phi \beta_z & 0 & 0 & 0 \\ \Phi \beta_y & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, β_w 、 β_u 、 β_z 、 β_y 是对模态矩阵 Φ 的选择矩阵。方程(3)即为开环结构控制对象,包含3个转动刚体模态。

假设具有状态空间形式的姿态控制模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_k \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, $x_k \in \mathbf{R}^{n_k}$, 是控制器状态。方程(5)包含控制律、传感器和执行机构模型。那么,从含控制闭环的干扰到相机镜面响应的通道采用如下方式实现:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_c & B_{c,w} \\ C_{c,z} & D_{c,zw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ w \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中闭环状态 $x_c = [x_p, x_k]^T$, 系统矩阵为

递特性:

$$G_{\Delta d w}(j\omega) = SC_{c,z}(j\omega I - A_c)^{-1} B_{c,w} + SD_{c,zw}. \quad (10)$$

2 仿真分析

2.1 计算模型

以某遥感卫星为例,利用一体化建模方法计算其在CMG(控制力矩陀螺)扰动作用下的光学相机的像移响应和从扰动源到像移的传递特性,并与子系统级的计算结果作对比分析。整星有限元模型如图1所示,共有72644个节点和69848个单元。利用NASTRAN软件作模态分析,取前600阶模态(前250Hz固有频率)。由于NASTRAN计算输出的刚体模态不单独分配到有限元全局坐标系的

各轴,无法作为控制闭环所采用,所以本文基于MATLAB平台利用节点的几何位置信息,独立计算得到3个转动刚体模态并进行质量归一化处理。基于模态信息建立了结构模型(3),模态阻尼比取0.005,干扰输入为4个CMG的扰动力和力矩。

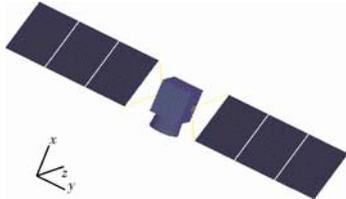


图1 某遥感卫星有限元模型

Fig. 1 Finite element model of a remote sensing satellite

给定的CMG扰动力和力矩由谐波叠加组成,各谐波频率所对应的扰动力和力矩的幅值如表1所示,表中各分量的坐标与图1相同。它们具有较强的宽频特性。

表1 干扰源数据

Table 1 Data of disturbance source

f/Hz	F_x/N	F_y/N	F_z/N	$M_x/(N\cdot m)$	$M_y/(N\cdot m)$	$M_z/(N\cdot m)$
60	0.40	0.4	0.30	0.05	0.07	0.09
100	11.40	5.2	2.10	0.34	0.90	0.45
120	1.30	1.6	0.80	0.13	0.05	0.20
142	0.33	0.4	0.13	0.05	0.03	0.07
200	2.10	2.5	1.80	0.25	0.30	0.41

姿态控制模型(5)的控制输入为由CMG安装点折算到质心处的3轴力矩,控制量测量输出为质心的转动角和转动角速度。模型的控制律由3个独立的PD(比例-微分)和二阶滤波器串联组成,镇定3个刚体转动模态,即有

$$K(s) = \frac{(k_d s + k_p) \omega_1^2}{s^2 + 2\xi_1 \omega_1 s + \omega_1^2}, \quad (11)$$

式中: k_p 、 k_d 分别是比例和微分增益; ω_1 和 ξ_1 分别是滤波器的转折频率和阻尼。姿态控制系统带宽为0.01 Hz,采样频率为20 Hz。传感器和执行机构模型近似为低通二阶传递函数。

空间相机灵敏度矩阵由光学系统设计软件Code V计算得到,所研究的空间相机光学系统模型是离轴三反光学系统(如图2所示),由主镜、次镜、三镜和焦面组成,焦距 $f'=7.8$ mm。

使用Code V软件依次对镜面和像面进行位置、姿态的摄动,并计算像移,即可获得灵敏度矩阵。

由以上CMG扰动源模型、整星模型、控制系统模型和光学系统模型构成一体化分析模型(9),模型中反映了微振动源的干扰特性、卫星的结构传

递特性、姿态控制系统的控制律和硬件特性以及光学系统的光路传递特性。

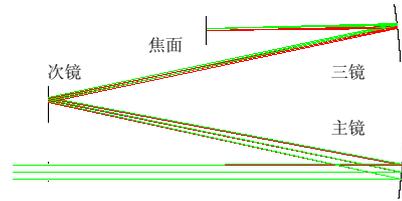
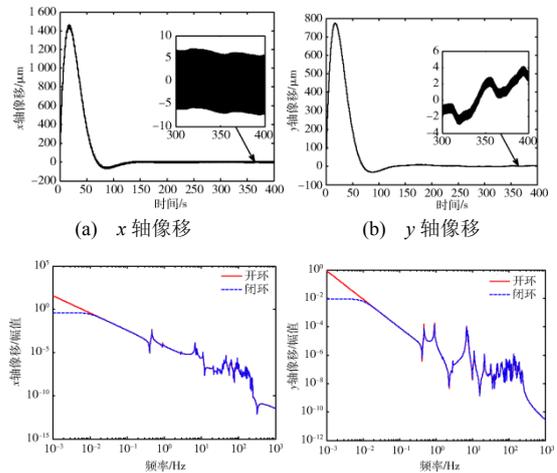


图2 空间相机光学系统模型

Fig. 2 Optical system model of space camera

2.2 计算结果

由式(9)计算时间响应,得到整星在CMG扰动源作用下的像移响应,如图3(a)和图3(b)所示,前200 s是控制系统的过渡过程,之后是像移稳态响应。可以看出,由于控制的闭环作用,零频刚体转动模态得到镇定,响应中不再出现开环计算情况下的姿态“漂移”现象,使得刚体“漂移”成分不影响计算结果的统计^[14]。由式(10)计算频率响应,得出整星在闭环情况下从扰动源到光学系统像移的传递特性,并与开环情况对比,如图3(c)和图3(d)所示。可以看出,由于姿态控制系统主要用于处理低频刚体转动模态的镇定问题,并不改变微振动源所处的中高频的响应特性。



(c) 扰动源到x轴像移传递特性 (d) 扰动源到y轴像移传递特性

图3 一体化建模的微振动响应和传递特性

Fig. 3 Micro-vibration response and transfer characteristics of integrated modeling

2.3 结果比较分析

子系统级分析方法在工程中应用比较广泛,它不考虑相机结构内部镜面之间的相对运动,只计算相机整体姿态(光轴指向)的颤振响应。作为比较,选择3种常用情形进行计算,即将主镜响应、相机

安装界面响应和相机等效为集中质量(不建立相机有限元模型)的响应作为相机光轴指向,利用 $\Delta d = f \tan \theta$ (θ 为相机光轴指向) 获取像移响应,如图4所示。与图3对比,可以看出,子系统级分析方法的计算结果与一体化分析的计算结果存在较大差异,特别是在y轴方向。

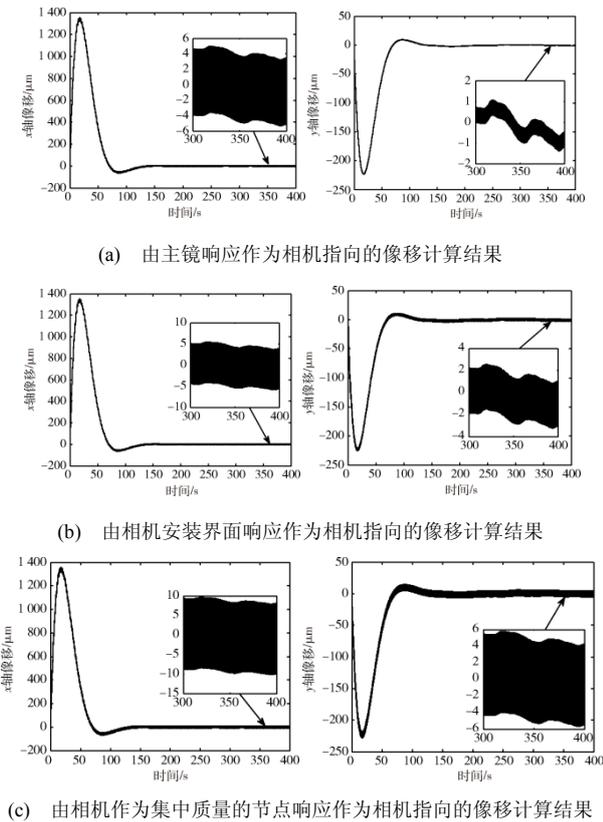


图4 子系统级建模方法的微振动响应
Fig. 4 Micro-vibration response of the modeling methods based on subsystem level

计算像移响应在不同积分时间内的峰-峰值,如表2所示。可以看出:

1) 基于主镜响应的子系统级分析方法的计算结果与一体化分析的结果比较接近,这是因为前者是后者的特例,由于只考虑了主镜的振动,没考虑到各个镜面之间的相对运动对光路的影响,幅值要小于一体化分析结果;

2) 基于相机安装界面响应和将相机等效为集中质量的子系统级分析方法的计算结果与一体化分析的结果差异较大,这是由于两种情形均不是基于光学相机内部的振动响应;

3) 将相机等效为集中质量的子系统级分析方法的计算结果相对于一体化分析结果较为保守,在

可行性论证阶段或方案阶段,或在相机设计方案未完全确定、缺乏有限元模型的情况下可以选择,用于不同设计方案的比较。

表2 光学相机在不同积分时间内的像移量
Table 2 Values of image motion of space camera at different integral times

积分时间/ms		1	20	50
一体化分析方法	x轴/ μm	4.006	12.938	12.945
	y轴/ μm	0.420	1.104	1.114
基于主镜响应的子系统级分析方法	x轴/ μm	2.654	8.573	8.580
	y轴/ μm	0.278	0.721	0.731
基于相机安装界面的子系统级分析方法	x轴/ μm	3.042	9.556	9.597
	y轴/ μm	1.530	4.070	4.088
将相机等效为集中质量的子系统级分析方法	x轴/ μm	4.819	16.938	18.084
	y轴/ μm	2.591	8.943	9.735

3 结束语

本文给出了一种基于全柔性卫星模型的结构-控制-光学耦合的系统级微振动建模方法,并结合某遥感卫星结构进行了仿真计算应用。该方法将整星结构模型、控制系统模型和光学系统模型按照实际的物理联系集成为一体化模型,用于高分辨率遥感卫星相机在轨微振动下的像移响应和传递特性研究。与基于主镜响应、基于相机安装界面和将相机等效为集中质量三种情形的子系统级分析方法的计算结果对比表明:一体化建模分析方法从原理上更接近卫星在轨实际工作情况,能够给出较为合理的微振动分析结果;三种情形的子系统级分析方法的结果均与一体化建模分析结果有差异,使用时应根据设计和分析的具体目的与条件恰当选择。本文研究结果可为目前高分辨率卫星微振动的工程分析提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 邹元杰, 王泽宇, 张志娟, 等. 航天器微振动稳态时域响应分析方法[J]. 航天器工程, 2012, 21(6): 37-42
Zou Yuanjie, Wang Zeyu, Zhang Zhijuan, et al. Analysis method of steady time-domain response for spacecraft micro-vibration[J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(6):37-42
- [2] 庞世伟, 杨雷, 曲广吉. 高精度航天器微振动建模与评估技术进展[J]. 强度与环境, 2007, 34(6): 1-8
Pang Shiwei, Yang Lei, Qu Guangji. New development of micro-vibration integrated modeling and assessment technology for high performance spacecraft[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(6):1-8

- [3] 张振华, 杨雷, 庞世伟. 高精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
Zhang Zhenhua, Yang Lei, Pang Shiwei. Jitter environment analyzing for micro-protection spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 528-534
- [4] Briggs H C. Integrated modeling and design of advanced optical systems[C]//AIAA Aerospace Design Conference. Pasadena, California, 1992
- [5] Miller D W, de Weck O L, Mosier G E. Framework for multidisciplinary integrated modeling and analysis of space telescopes[C]//Proceeding SPIE, 2002, 4757: 1-18
- [6] Stone C M, Holtery C. The JWST integrated modeling environment[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004, 6: 4041-4047
- [7] Miller D W, de Weck O L, Uebelhart S A, et al. Integrated dynamics and controls modeling for the space interferometry mission(SIM)[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, MT, 2001, 4: 2089-2012
- [8] Mosier G E, Howard J M, Johnston J D, et al. The role of integrated modeling in the design and verification of the James Webb space telescope[C]//Proceeding SPIE. Denver, CO, 2004, 5528: 96-107
- [9] LoBosco D M, Blaurock C, Chung Soon-Jo, et al. Integrated modeling of optical performance for the terrestrial planet finder structurally connected interferometer[C]//Proceeding SPIE. Glasgow, Scotland, 2004, 5497: 278-289
- [10] 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
Zhang Bowen, Wang Xiaoyong, Hu Yongli. Integrated analysis on effect of micro-vibration on high resolution space camera imaging[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(2): 60-66
- [11] 张志娟, 邹元杰, 关晓东, 等. 基于柔性多体理论的遥感卫星颤振分析方法研究[C]//高分辨率遥感卫星结构振动及控制技术研讨会, 2011: 329-335
- [12] 蒋国伟, 周徐斌, 申军烽, 等. 某卫星微振动建模与仿真[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 36-40
Jiang Guowei, Zhou Xubin, Shen Junfeng, et al. Modeling and simulation of micro-vibration for a satellite[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 36-40
- [13] 庞世伟, 潘腾. 微振动对图像质量影响评估方法研究[C]//高分辨率遥感卫星结构振动及控制技术研讨会, 2011: 163-170
- [14] 葛东明, 邹元杰, 张志娟, 等. 基于全柔性卫星模型的控制闭环微振动建模与仿真[J]. 航天器工程, 2012, 21(5): 36-41
Ge Dongming, Zou Yuanjie, Zhang Zhijuan, et al. Control closed-loop micro-vibration modeling and simulation based on flexible satellite model[J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(5): 36-41

Structure-control-optics integrated modeling and micro-vibration analysis for high resolution satellite

Ge Dongming, Zou Yuanjie

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: For the micro-vibration analysis of the high resolution remote sensing satellite, a structure-control-optics integrated modeling method is adopted. According to the physical relationship, the micro-vibration disturbance model, the structure model of the satellite, the control system model and the optical system model are integrated. As a result, the in-orbit image motion responses of the space camera under a micro-vibration, as well as the transfer characteristics from the disturbance to the image motion can be predicted. With an example of a remote sensing satellite, the image motion responses and the transfer characteristics of the micro-vibration disturbance are analyzed and compared with those obtained by other methods used in engineering. It is demonstrated that the integrated modeling and analysis method is closer to the in-orbit situation in terms of its principle and the prediction of the micro-vibration responses is reasonable. There are some differences between this method and other methods used in engineering, which should be appropriately selected according to the purposes and conditions of the design and the application.

Key words: satellite; micro-vibration; integrated modeling; image motion

(编辑: 许京媛)