

随机振动对星载 TDICCD 影响分析*

陈丁跃^{1,2} 周仁魁² 李英才²

(1 长安大学, 西安 710064)

(2 中国科学院西安光机所, 西安 710068)

摘要 研究了星载 TDICCD 的成像机理,着重分析卫星扰动引起 TDICCD 随机振动,造成图像质量下降,给出了典型的振动传递率和可行的振动抑制方法. 为了提高 TDICCD 减振的能力,对 TDICCD 实施隔振和阻尼抑振控制技术. 同时分析了振动控制的基本原理和设计原则,给出了相关的设计.

关键词 随机振动;TDICCD 相机;卫星;振动抑制

中图分类号 V445.8 **文献标识码** A

0 引言

星载 TDICCD (时间延迟积分 CCD) 相机在主动段会受到卫星发动机脉动推力、喷气噪声以及紊流边界层噪声综合产生的随机振动激励. 因此,需要相机要有很强的抑制振动能力,而对准和跟踪准确度是受卫星固有的振动噪声和其它与相机有关的噪声直接影响的. 这些噪声使得相机产生颤动,增加了视轴对准误差从而降低了摄像性能. 其中卫星平台的振动是引起相机视轴对准误差的主要因素. 对于相机设计而言,卫星平台振动的频谱特性是设计的关键. 轨道运行过程中卫星平台和空间环境引起的振动为星载 TDICCD 的正常工作提出了严峻的考验. 因此,在星载 TDICCD 上应用隔振和阻尼减振连接技术越来越得到了广泛的应用^[1-5]. TDICCD 上采用隔振和阻尼减振技术,一般从两方面考虑: 1) 为星载精密仪器有效地隔离扰动源的振动激励; 2) 最大限度地抑制扰动源振动能量的向外传播,实现对星载关键部件及 TDICCD 振动控制. 本文对星载 TDICCD 相机中减振连接结构的减振特性进行了分析. 基于卫星平台结构集成化的构成思想,给出了星上减振连接结构的通用描述方案. 推导出规范化的计算模型,提出以各结构振动为权衡指标来表征结构的抑振特性. 最后,以星载 TDICCD 相机的简化模型为例进行了仿真分析,揭示了振动能量沿各结构的频域分布特性,并从振动传递率角度解释了减振机理.

1 星载 TDICCD 工作原理及 CCD 视场拼接

星载 TDICCD 相机成像过程中,始终处于运动状态,在一定的曝光时间内,被摄目标影像与相机之间存在相对运动,即相对的影像运动. 对于传输型卫星,一般采用线阵 CCD,利用卫星平台的运动推扫成像. 由于推扫式成像具有探测器积分时间较长、高的灵敏度、没有活动部件、自身转动惯量小、对平台姿态影响小等优点,使得线阵 CCD 推扫式成像系统得到了广泛的应用.

TDICCD 由多行线阵 CCD 组成,是基于对同一目标进行多次曝光的原理工作的. TDICCD 相机摄影时,相机随卫星向前运动,对地面同一个静止目标多次曝光成像. 随着曝光级数增大,传感器累计的电荷与级数成正比地增大,使焦面总的曝光时间增加了. TDICCD 相机的光路为图 1. 在焦平面上,线阵 CCD 视场拼接安装方法为图 2. 被摄目标为地面上静止的物体,相机随卫星向前运动. 在 t_1 时刻,物体在第 1 级(行) CCD 上曝光成像,产生电荷信号; t_2 时刻,由于相机向前运动,经过了一个行周期后,第 2 级 CCD 再次对同一个物体曝光成像,产生电荷信号. 与此同时,时钟信号驱动第 1 级 CCD 上产生的电荷转移到第 2 级 CCD 上. 这样,该行 CCD

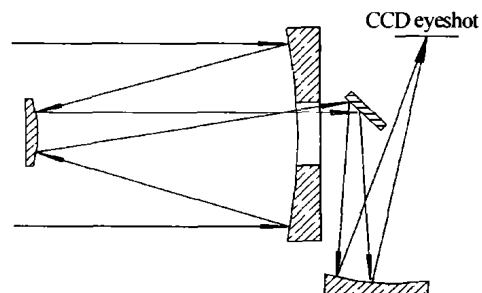


图 1 光路图
Fig. 1 The light route figuration

* 国家博士后基金和国家 863 项目资助

Tel: 13072980199 Email: cdy868@163.com

收稿日期: 2004-01-07

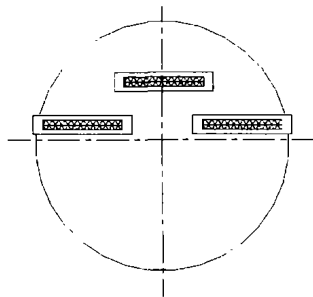


图2 CCD 视场拼接
Fig.2 Join of the CCD

不仅包括此次曝光产生的电荷,而且也包括前一转移来的电荷,使电荷量增加了1倍.依此类推,若TDICCD的级数为 N ,相机输出信号将增加为原来的 N 倍.

TDI工作模式的一个主要特点是它能够在较低的光照下工作,可以与小相对孔径($1/8 \sim 1/14$)的光学系统配合成像,从而大幅度减少遥感相机的体积和质量.另外,随着TDI级数增加,信号随TDI级数(N)成线性增加,而噪声随TDI级数成平方根增加,TDICCD的信噪比(SNR)可以增加 \sqrt{N} 倍,它解决了星载相机光能量不足的难题.TDICCD另一个特点是通过多次曝光可减少像元间响应不均匀和固定图形噪声的影响.

2 卫星运动引起随机振动及TDICCD减振连接

2.1 卫星运动引起高阶随机振动

卫星在运动过程中,受地球非球形引力、大气阻力、日月引力及太阳光压力等的影响,卫星的运动轨道会产生高阶短周期振动.地球非球形引力摄动对轨道的进动影响可以表示为

$$\frac{d\Omega}{dt} = -9.97 \frac{\cos i}{(1-e^2)^2} \left(\frac{R_e}{a}\right)^2 \quad (1)$$

式中: R_e 为地球赤道半径,取6378.140 km, a 为卫星轨道的半长轴, e 、 i 、 Ω 分别为卫星轨道的偏心率、倾角和升交点赤经.

利用式(1)可以列出太阳同步轨道中 a 、 e 、 i 三个参数的关系式

$$\cos i = -4.7736 \times 10^{-15} (1-e^2)^2 a^{7/2} \quad (2)$$

当偏心率 $e=0$,卫星轨道为圆轨道时,式(2)可化简为

$$\cos i = -4.7736 \times 10^{-15} a^{7/2} \quad (3)$$

当地面高度为630 km的太阳同步轨道时,三个主要参数 a 、 e 、 i 的主要短周期振动项列于表1,半天内半长轴 a 的变化见图3.从图3和表1中可见,轨道参数的高阶振动量是比较大的,特别是轨道半长轴(卫星地面高度),因此在星载TDICCD减振过程

中,必须考虑卫星轨道的高阶随机振动和抖动.

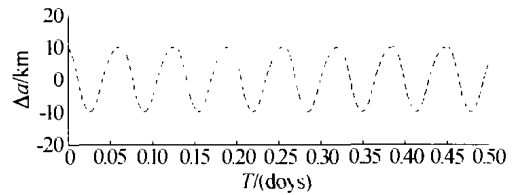


图3 半天内半长轴 a 的变化
Fig.3 Change of half axes a in half of the day

表1 参数 a 、 e 、 i 的主要短周期高阶随机振动

轨道参数	振幅	周期/天
a	9.26/km	0.0335
	8.9×10^{-3} /km	0.067
e	7.74×10^{-4}	0.0222
	3.09×10^{-4}	0.067
i	$5.35 \times 10^{-3}/(^{\circ})$	0.0335
	$5.2 \times 10^{-6}/(^{\circ})$	0.067
	$1.7 \times 10^{-6}/(^{\circ})$	0.0222
	$5.53 \times 10^{-4}/(^{\circ})$	0.5

2.2 星载TDICCD减振连接

在卫星平台上会出现一些较高频率的随机振动、抖动,应采取必要的有效措施加以抑制星载TDICCD的振动.直接影响TDICCD成像质量的原因是像移,像移是指卫星姿态角变化,轨道速高比的变化,地球自转,星上活动部件颤振等因素引起的.像移达到一定程度时会使目标在像面的对比度下降;而振动又是产生像移的主要原因,能否有效控制振动是TDICCD成像质量好坏的关键.为了解决星载TDICCD相机在摄像时,由于卫星轨道摄动、姿态漂移、星上部件颤振造成的像移影响,减振措施可用图4来表述,可划分为振源体、平台支撑体、星载TDICCD及减振器等,各体结构间通过连接界面间的随机振动响应和动态力形成耦合关系.

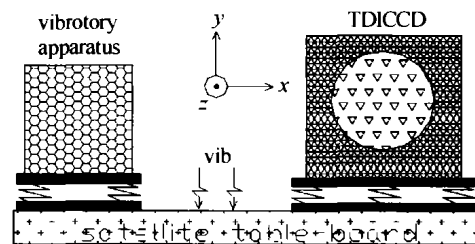


图4 星上TDICCD减振连接描述图

Fig.4 The principle chart of TDICCD reducing vibration installation

3 星载TDICCD随机振动控制

振动环境条件一般由运载方提供,频率范围为20~3000 Hz.为考核星载TDICCD相机在宽带随机振动环境下的可靠性,必须在地面进行星载相机及零部件级的随机振动试验.通常,星载相机随机振动试验在激振台上进行,依次对星载相机的三个方向施加加速度谱.试验的核心部分是测量星载相机

上若干测点的加速度响应,表 2 是在 2XSA60-T1000-32WL 振动台上测到的星载 TDICCD 上水平筋切点处三个方向随机振动数据,其峰值点处的频率为 506.84 Hz,幅值为 3.68 g.

表 2 TDICCD 随机振动试验三向测量数据

试验状态	随机振动(20~2000 Hz, +3~-9 dB/oct)					
方向	第一谐振点		第二谐振点		第三谐振点	
	频率/Hz	幅值/g	频率/Hz	幅值/g	频率/Hz	幅值/g
y	111.33	0.99	210.94	1.38	506.84	3.68
x	71.04	3.00				
z			147.2	7.55		

为了保证星载 TDICCD 能够适应不同运行阶段的振动环境,需要用减振器将其连接在卫星平台上.当考虑图 4 扰动影响时,其振源是由卫星平台支撑的随机扰动力引起,使星载 TDICCD 受到位移激励 $y = y_0 \sin \omega t$ 的影响.星载 TDICCD 减振控制模型可抽象为图 5 所示分析模型,研究其沿 Y 向的振动特性及响应.根据图 5 及系统运动微分方程(4),并对其进行拉普拉斯变换得出振动传递率如式(5).

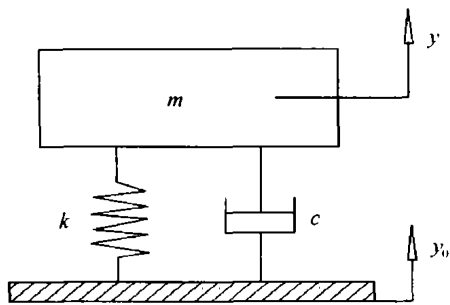


图 5 星载 TDICCD 减振系统

Fig. 5 The model of TDICCD reducing vibration

$$m \ddot{y} + c(\dot{y} - \dot{y}_0) + k(y - y_0) = 0 \quad (4)$$

$$\Phi = \frac{|y|}{|b|} = \frac{\sqrt{1 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (5)$$

式中 m 为 TDICCD 质量; k 为减振器的刚度系数; c 为减振器的阻尼系数; Φ 为传递率; ω 为激励圆周角频率; ω_n 为减振器固有角频率; y 为受迫振动的位移; \dot{y} 为受迫振动产生的速度; \dot{y}_0 为受迫振动产生的加速度; y_0 为振动源产生的位移; ξ 为阻尼比.

在卫星平台上施加幅值为 1000 N 的谐波激励(扰动力).在计算过程中,要对中间数据-频率响应数据进行整合以获得振动频域分布特性.为了验证计算的正确性,这里以考核计算中间数据(频率响应数据)的正确性来反映振动计算的正确与否.传递率曲线如图 6 可知,无论阻尼比 ξ 多大,只有当频率比 $\lambda = \omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 时,才有减振效果,并且随着 λ 的增加,减振效果愈好.增大阻尼,可以减小 TDICCD 在卫星扰动过程中经过共振区时的最大振幅.图 7 给出了系统位移频率响应曲线.从 1~3000 Hz 频段内响应曲线可知,在低频共振区内两

种计算出现差异,曲线数据显示整体计算中阻尼较大,使其峰值响应较小.中高频段时,两种计算趋于吻合.从能量角度解释减振连接的机理,在卫星平台处施加幅值为 1000 N 的谐波激励下,低频段振动能量主要集中于减振器上.随着频率的增加,振动能量趋向滞留在振源上,减振器能有效地抑制振动向外传播,具有显著隔振效果.

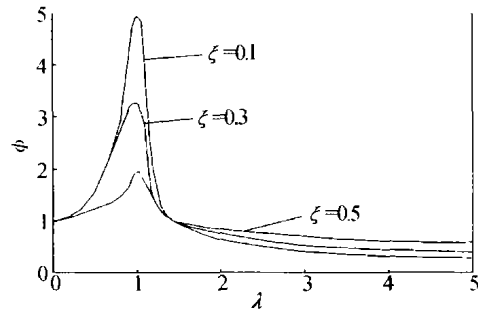


图 6 传递率曲线

Fig. 6 Transfer rate relation

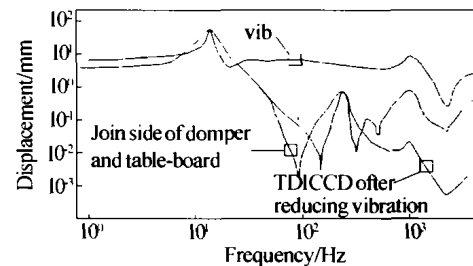


图 7 位移频率响应曲线

Fig. 7 Displacement-frequency relation

在卫星平台与星载 TDICCD 间引入减振器连接,其作用在于低频阻尼减振和高频隔振.在抑振的同时,如果出现残余扰动位移时,从图 7 看出 TDICCD 在 300 Hz 时显露 0.1 mm 左右的扰动位移,那么可采用微波发射控制信号关闭星上辅助仪器振源体或备用星载伺服抑振控制系统,此刻,星载 TDICCD 相机可对锁定目标进行摄像,这样能进一步保证成像准确度.

4 结论

本文以某星载 TDICCD 减振连接结构为背景,建立了规范化的模型,由于卫星平台存在三个方向的随机扰动,需要通过振动控制将动能转化为材料内部分子的摩擦热能释放出去,对于振动控制装置要设计成无振动位移的结构形式,尽可能地控制载体传来的扰动位移,并在三个方向都具有抑振作用.由于隔振和阻尼抑振控制技术具有不需能源、技术成熟、价格低廉等特点,所以在空间领域中广泛的应用.在减振器设计时,要保证弹性轴对称且相互平行、线性度好;其刚度中心与平台重心重合;固有频率与伺服系统带宽要相匹配;合理选择减振器的固有频率、阻尼参数,使抑振系统能够减小低中高频振

动,又不发生共振;最大限度地限制星载 TDICCD 随机振动。

参考文献

- 1 Jutamulia S. Joint transform correlators and their applications. *Proceedings of SPIE*, 1992, **1812**: 233 ~ 243
- 2 Janschek K, Tcherykh V, Dyblenko S. Design Concept for the Secondary-Payload Earth Observation Camera. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3870**: 78 ~ 86
- 3 胡永力, 谭南征. TDICCD 相机侧摆 MTF 的研究. 航天返回与遥感, 2003, **24**(1): 33 ~ 37
Hu Y L, Tan N Z. *Spacecraft Recover & Remote Sensing*, 2003, **24**(1): 33 ~ 37
- 4 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001. 28 ~ 29
- 5 屈维德, 唐恒龄. 《机械振动手册》第二版. 北京: 机械工业出版社, 2000. 268 ~ 769
- 6 雷穆禄, 郁永熙. 人造卫星转动动力学. 上海: 上海交通大学出版社, 1996. 50 ~ 53
Lei M L, Yu Y X. *Dynamics to Satellite Running*. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1996. 50 ~ 53

Influence Analysis of Random Vibration on TDICCD Camera

Chen Dingyue^{1,2}, Zhou Renkui², Li Yingcai²

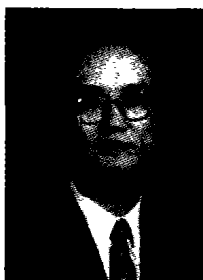
1 Chang'an University, Xi'an 710064

2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2004-01-07

Abstract The principle of image for the satellite TDICCD camera was researched, the decrease of image quality caused by the TDICCD random vibration due to the vibration of a satellite was analyzed. The typical vibration's transfer rate and the feasible methods of vibration suppression were given. In order to improve the ability of TDICCD reduce vibration, control techniques that isolate vibration on TDICCD and damping vibration of TDICCD were implemented. At the same time, the base principle and the design criterions of vibration control were analyzed and the correlation design was given.

Keywords Random vibration; TDICCD camera; Satellite; Vibration suppression



Chen Dingyue is a post-doctor in XIOPM of CAS and an associate professor in Chang'an University. His main research involved the vibration suppression and the vibration analysis of devices.