

航空稳像光电平台设计*

钱义先^{1,2}, 梁伟¹, 高晓东¹

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:分析了随机振动对调制传递函数的影响,指出角位移是影响航空成像质量的主要因素.研究了特定条件下可容许的 MTF 下降,并转变为稳定系统的设计参量,用来指导稳像系统的设计.利用空间机构学及平行四边形平动原理,研制了一种新的无角位移减振稳像平台,满足既无角位移又达到减振要求.根据设计理论给出了设计实例,对频率高于 100 HZ 的振动,衰减达 34 dB,并利用动力学软件进行测试仿真,仿真曲线验证无角位移减振的正确性,同时对无角位移机构进行光学测试,结果耦合角度小于 8",可以满足航空成像要求.

关键词:调制传递函数;航空相机;振动;光电平台;角位移;稳像

中图分类号: TG113.25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)07-2108-4

0 引言

在许多高分辨率的航空光电成像系统中,尽管使用了高质量的传感器,但获得的像质并不理想,限制高分辨率成像的主要因素往往不是因电子学或光学系统引起的,这种图像模糊退化主要是航空振动引起的.振动引起图像模糊主要由以下两个原因:1)成像系统相对于飞机的转动;2)目标相对于成像系统的横向运动.在动态成像曝光时间内,成像点相对于传感器要移动,像移部分能够消除,残留的像移就成为像模糊的主要因素.采用 MTF 评价像质,建立振动参量与调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 之间的关系,分析各项参量对 MTF 如何影响和影响多大十分必要.国外 O. Hadar^[1] 等人对振动影响成像系统 MTF 进行了相关研究,国内相关文献[2-4]也对振动引起的 MTF 下降及振动控制技术进行了研究.

研究了属于被动控制技术的一种双平行四边形无角位移减振[5-7]稳像[8]平台,它既限制了振动角位移的产生,又具有隔振的效果,可用于航空测量和侦察上,提高成像质量,改善侦察效果.

1 随机振动容许误差与稳像参量分析

航空相机系统的 MTF 受到光学系统、振动、环境、CCD 器件、大气、电子系统以及装调等影响,可以表示为

$$MTF = M_{opt} \times M_{vib} \times M_{env} \times M_{CCD} \times M_{atm} \times M_{clc} \times M_{adj} \dots$$

相关文献[9-10]指出动态工作时 MTF 必须达到 0.02~0.05 时,地面像元分辨率才能达到几何光学分辨率.根据该相机系统的实际参量,合理分配各种因素造成的 MTF 的下降,设二维振动引起的传递函数为

$$MTF_{vibration} = MTF_x \times MTF_y = 0.8 \quad (1)$$

振源不同引起的振动形式也是多种多样的,其中引起光轴抖动的随机振动形式是最常见的.如果振动引起的扩散函数是随机振动形式且服从高斯分布,则扩散函数 $f_x(x)$ 和其引起的 MTF 下降可表示为

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$MTF = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) \exp(-i2\pi fx) dx \right| = e^{-2\sigma^2 \pi^2 f^2} \quad (3)$$

式中 σ 为振动均方根值, f 为空间频率, x 为随机变量.在这里假设曝光时间远大于图像在 CCD ($10\mu\text{m}$) 面上穿越几个来回.根据式(3)可以仿真得到 MTF 在不同振动均方根值下的归一化曲线,如图 1,随着振动均方根值的增大,MTF 迅速下降.

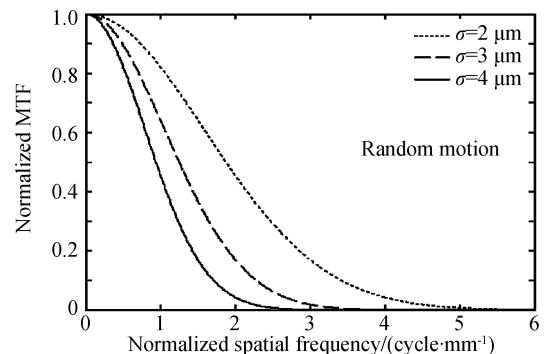


图 1 随机振动下的 MTF 归一化曲线
Fig. 1 Normalized MTF of random vibration

* 中科院创新基金(ck0308)

Tel:13568951861 Email:sanmao1861@yahoo.com.cn

收稿日期:2008-07-10 修回日期:2008-09-01

MTF 是光学设计师所关心的参量,如何将可容许的 MTF 下降值转化为可识别和测量的参量,如 RMS 跳动幅度、最大运动角振幅以及振动频率等是系统控制工程师所关心. 这些参量可以精确指导和进行合理设计稳像系统. 因此,将可容许的残留像移大小转化为稳像系统参量是十分必要的.

如图 2,角振动引起的像移量可表示为

$$\varepsilon = \sigma / f' \quad (4)$$

式中 ε 为角位移, f' 为焦距, σ 为像移. 根据相机高空动态成像可知,当实际地面成像分辨率在 3 pixel 内对目前的水平是合适的. 根据实际系统参量可知角位移不能超过 $9''$.

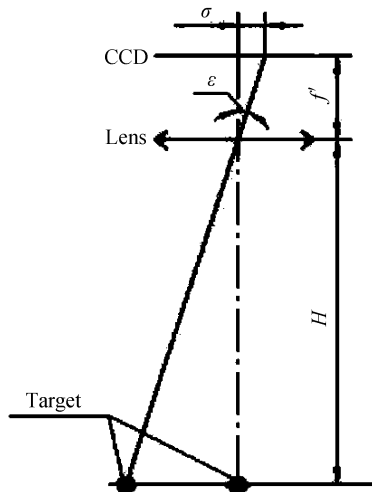


图 2 角振动下像移计算

Fig. 2 Image motion of angular vibration

可以看出角位移的大小严重影响高分辨率成像质量,导致 MTF 下降,系统对角振动要求十分苛刻,因此消除振动对成像的影响主要是要控制角位移的大小,横向振动对成像质量影响可以忽略不计. 合理设计的无角位移减振光电平台原理上可以消除角位移又可以减振、隔离高频成分.

2 被动减振及无角位移机构设计

2.1 被动减振的基本原理

被动减振的基本模型是弹性阻尼质量系统,根据牛顿定律写出方程(5),并对其进行拉普拉斯变换可以得出振动传递率方程(6).

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = ku \quad (5)$$

$$T = \frac{|x|}{|u|} = \frac{1 + \left[2\xi \frac{\omega}{\omega_0} \right]^2}{\sqrt{\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right]^2 + \left[2\xi \frac{\omega}{\omega_0} \right]^2}} \quad (6)$$

式中各符号意义如下: k : 弹性系数; c : 阻尼系数; ξ : 阻尼比; T : 传递率; ω : 激励角频率; ω_0 : 减振器固有角频率; x : 受迫振动位移; \dot{x} : 受迫振动产生的

速度; \ddot{x} : 受迫振动产生的加速度; u : 振动源产生的位移; m : 载荷质量.

根据式(6)可以得到振动传递率曲线图 3. 由图 3 中可以看出,在相当大的范围内, ω/ω_0 都小于 $\sqrt{2}$, 振幅 T 都大于 1. 因此,在减振器选择不恰当时,不仅不能起到减振作用,反而使振动加强. 一般取 $\sqrt{2} \leq \omega/\omega_0 \leq 4$, 并保证振幅比 $T < 1$. 同时也可以看出,系统的阻尼比 ξ 愈小,减振效果愈好,但在共振区内 ξ 不能过小. 因为减振装置具有减小振动的同时,还要考虑减小冲击的影响,冲击脉冲可能包含由零到无穷大的频率分量,因此不可避免的造成共振,所以 ξ 不能过小.

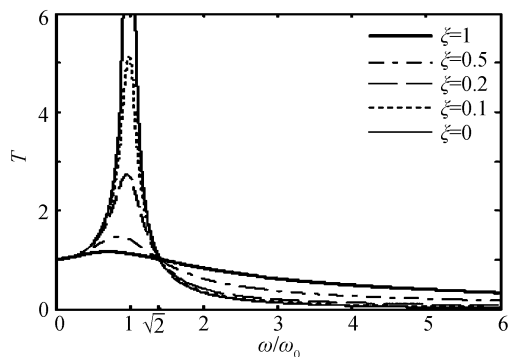


图 3 振动传递率曲线

Fig. 3 Transmissibility curve diagram

2.2 无角位移减振设计

无角位移的作用是在相机曝光瞬间(约 4 ms)将相机角振动转化为线振动,使相机视轴只发生平动(平动对像质影响较小),再通过隔振减小振幅. 该机构主要利用平行四边形机构平动原理,将角位移转化为线位移,平行四边形机构运动是平动,所以理论上不会产生角位移,这样平台只能沿 x 、 y 和 z 三个方向平动.

设计的无角位移减振器如图 4. 在基座和载荷平台之间对称布置四个性能参量完全相同的减振元件.

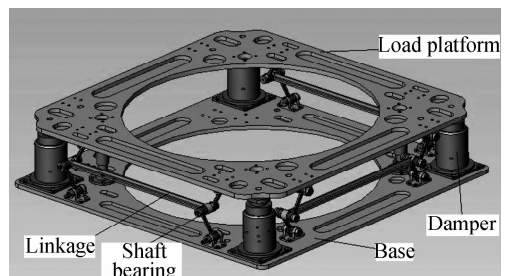


图 4 无角位移减振器

Fig. 4 Irrotational displacement isolator

3 设计实例与实验结果

某航空光电系统总重量 80 kg, 飞机发动机转

速 1440 转/分. 设计四个相同的减振元件均布在下底座上, 则每个减振单元承受的重量

$$G = 80 \times 10 / 4 = 200 \text{ N} \quad (7)$$

取 $g = 10 \text{ m/s}^2$, 飞机发动机的转速 1440 转/分, 即振源频率 $f = 24 \text{ Hz}$. 从图 3 可以看出为确保设计的系统具有减振效果, 即振幅比 $T < 1$, 固有频率 f_0 范围为

$$f_0 \leq f / \sqrt{2} \quad (8)$$

但 f_0 又不能太小, 因此取 $f_0 = f / 4 = 6 \text{ Hz}$.

阻尼 $\xi < 1$ 时系统才是振荡的, 且系统的阻尼 ξ 愈小, 减振效果愈明显 (如图 3), 但在共振区内 ξ 不能过小, 因为还要考虑冲击带来的共振, 所以取 $\xi = 0.2$.

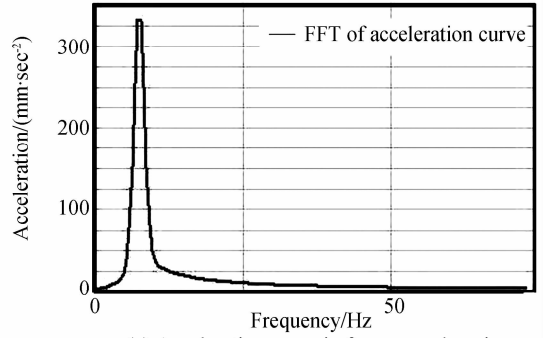
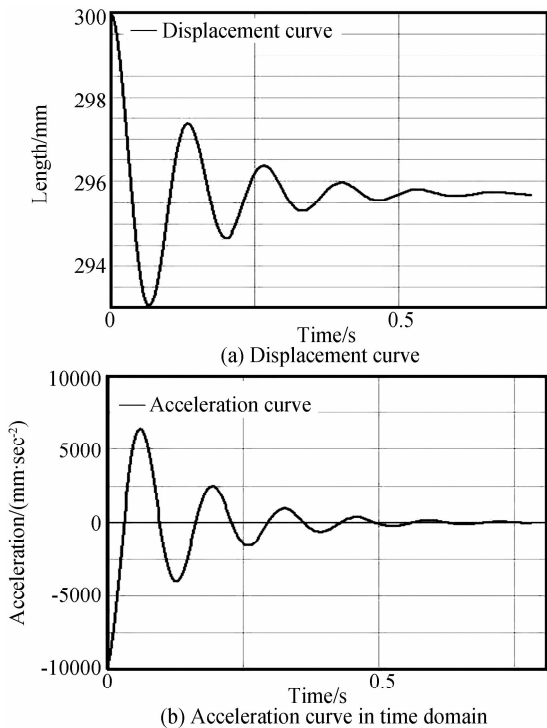
在已知固有频率 f_0 的条件下, 弹簧的弹性系数可由下式计算得

$$k = \omega_0^2 m = (2\pi f_0)^2 m = 28.7 \text{ N/mm} \quad (9)$$

根据实际经验和结合具体情况, 阻尼系数选取在 $0.1 \sim 0.3 \text{ N} \cdot \text{S/mm}$, 因此取阻尼系数 $C = 0.2 \text{ N} \cdot \text{S/mm}$.

运用三维软件 solidworks 建模, 然后将其通过接口导入到仿真软件 MSC. ADAMS 中, 对减振机构进行仿真分析, 获得该无位移减振器上系统负载在垂直方向振幅位移和加速度的衰减输出曲线, 如图 5(a) 和 (b). 对振动频率为 24 Hz, 衰减 18.4 dB, 能将 88% 的振动隔离, 振动频率为 100 Hz, 衰减 34 dB.

从仿真输出曲线可以看出, 最大振幅约 3.5 mm 左右, 且振幅和加速度随时间都迅速衰减趋于直线, 满足减振要求. 图 5(a) 和 (b) 是用时域形式分析振



(c) Acceleration curve in frequency domain

图 5 仿真曲线

Fig. 5 Simulation curve

幅、加速度的响应曲线, 用频域代替时域分析问题有时更加直观. 将加速度曲线进行快速傅立叶变换 (FFT), 可以得到加速度的频域输出曲线如图 5(c).

从图 5(c) 可以看出, 该加速度的响应共振发生在 8 Hz 左右, 外部激励的高频成分被很快隔离, 而且高频激励下的谱值也迅速减小为零, 即能有效隔离外部激励传递的高频成分.

利用平行光管和反射法对无角位移的准确度也进行了光学实验, 测量实验装置如图 6. 首先将平行光管放置在隔离地基上, 将反射镜置于被测无角位移平台上, 反射后的平行光进入光电成像系统成像于 CCD 中心, 当振动有微小角位移产生时, 反射成像偏离 CCD 中心, 从偏离量可以得到角位移的大小. 实测结果表明, 在 4g 的激励振动下, 对于 20 Hz 以上振动角位移最大为 $8''$, 100 Hz 以上振动角位移小于 $6''$, 满足航空光电成像系统总体要求.

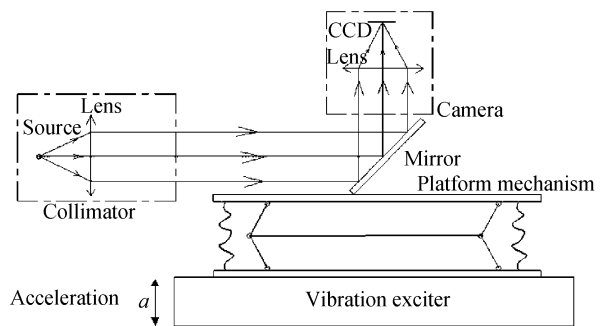


图 6 无角位移实验

Fig. 6 Experiment of irrotational displacement mechanism

3 结论

利用平行四边形原理和隔振理论, 设计了一种既无角位移又具有减振功能的光电平台, 能将机载、星载振动引起的角位移转化成线位移, 同时又能有效抑制直线振动, 可广泛应用于瞄准、跟踪和测量等光电仪器上, 用以提高光电系统的动态分辨率, 增强图像的清晰度和改善光电侦察效果. 最后给出了设计实例, 实验验证了隔振效果和转化角位移, 满足高

分辨率成像要求,在工程中具有实用价值.

参考文献

- [1] HADAR O. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations [J]. *Optical Engineering*, 1992, **31**:581-589.
- [2] FAN Chao, LI Ying-cai, YI Hong-wei. Influence analysis of buffeting on image quality of TDICCD camera [J]. *Acta Photonica Sina*, 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.
- [3] CHEN Ding-yue, ZHOU Ren-kui, LI Ying-cai. Influence analysis of random vibration on TDICCD camera [J]. *Acta Photonica Sina*, 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.
- [4] ZHANG Yun. Analysis of modulation transfer function for linear CCD reconnaissance camera system [J]. *Acta Photonica Sina*, 1993, **22**(3):356-362.
张云. 线阵 CCD 侦察相机系统调制传递函数分析 [J]. 光子学报, 1993, **22**(3):356-362.
- [5] KHORRAMI F. A three degree-of - freedom adaptive passive isolator for launch vehicle payloads [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, **3991**:164-175.
- [6] ZHANG Bao, JIA Ping, HUANG Meng. Passive vibration control of image blur resulting from mechanical vibrations on moving vehicles [J]. *Optical Technique*, 2004, **11**(4):46-49.
张葆,贾平,黄猛. 动载体成像模糊的振动被动控制技术 [J]. 光学技术, 2004, **11**(4):46-49.
- [7] DING Wen-jing. Theory of Damp [M]. Beijing: *Qinghua University Press*, 1998.
丁文镜. 减振理论 [M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [8] WANG Guo-fu, YU Fa-shan, WANG Xu-dong. Study of image stabilizing algorithm for airborne electro-optical tracking system [J]. *Acta Photonica Sina*, 2007, **36**(sup):253-255.
王国富,余发山,汪旭东. 机载光电跟踪系统的电子稳像算法研究 [J]. 光子学报, 2007, **36**(sup):253-255.
- [9] CHEN Rong-li, LI Ying-cai, FAN Xue-wu. Investigation on synthetically evaluating image quality of TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2003, **24**(3):10-13.
陈荣利,李英才,樊学武. TDICCD 相机像质综合评价研究 [J]. 航天返回与遥感, 2003, **24**(3):10-13.
- [10] YANG Bing-xin. Research of the static MTF for the aerospace TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2004, **25**(3):22-24.
杨秉新. 航天 TDICCD 相机静态调制传递函数研究 [J]. 航天返回与遥感, 2004, **25**(3):22-24.

Design of Optoelectronic Platform for stable image on Airborne Reconnaissance

QIAN Yi-xian^{1,2}, LIANG Wei¹, GAO Xiao-dong¹

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received date: 2008-07-10

Abstract: Modulation transfer function (MTF) resulting from random vibration was analyzed. The effect angular displacement was regarded as major factor to affect the image of aerial camera. Allowable MTF degradation was represented, and allowable MTF degradation was converted into stable system design parameters. The parameters can guide perfect design for stabilization system. Based on the spatial mechanism and translational principle of parallelogram, an irrotational displacement isolator was developed, which can meet the requirements of irrotational displacement and damp. An instance was given, and 34 dB reduction was achieved at frequency of 100HZ. With the help of MSC, ADAMS simulation software, curve proves correct for isolator was simulated, and the irrotational displacement mechanism was tested by optical method with coupled angle being less than 8", which can satisfy the demand of aerial imaging.

Key words: Modulation transfer function; Aerial camera; Vibration; Photoelectric platform; Angular displacement; Image stabilization



QIAN Yi-xian was born in 1974. He is studying for his Ph. D. degree at Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences. His research interests focus on aerial imaging and optical design.