

航空机载光学设备的振动分析及座架减震器的设计

赵鹏 杨牧 张葆

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 通过分析振动因素对航空机载光学设备成像质量的影响, 建立光学影像降低与振动的关系式, 根据减震器的基本设计原则及实际的工作振动条件, 结合某航空摄像机的设计指标, 完成某航空摄像机的减震器设计。

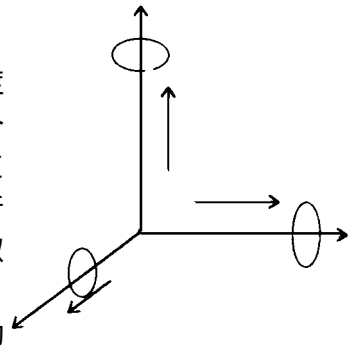
关键词: 振动; 减震器

1 引言

航空机载光学设备是装载在航空飞行器上拍摄地表景物来获取地表或大气层信息的装置, 这些信息在科学研究和生产活动中都起到了不可替代的作用, 所以对航空机载光学设备的研究是工程领域的一个重要的课题。由于航空机载光学设备装载在飞行器上, 飞行器的振动会通过航空机载光学设备的座架固定点传到光学系统上, 影响成像质量。本文通过分析像质变化的规律, 找出振动对像质影响的主要方面, 并以此为根据指导了某航空摄像机的座架减震器设计。

2 航空相机的振动对其像质的影响

为了分析相机振动, 认为航空相机载体在空中的航行速度为零(航速引起的像质降低由像移补偿装置来解决), 建立一个以航空相机光学系统节点为坐标原点, 以 z 轴为光轴方向的直角坐标系, 并把振动分解成为三个坐标轴的基本运动(如图1所示), 即沿三个轴的平动和绕三个轴的转动。这些运动使被拍摄的物点在曝光成像过程中, 成像在航空相机焦面的不同位置上, 这种光学影像的相对位移会使像质下降, 下面就对各种运动的影响进行分析。



ig 1 Aerocamera vibration sketch

2.1 线位移对像质的影响

航空相机的复合运动中包含了三种线位移: OX 、 OY 、 OZ 的平动, 由于光轴方向 Z 与光轴重合, 认为 OX 、 OY 的光学系统是对称的, 所以其运动规律是一致的, 航空相机 OX 在和 OY 方向的移动相当于地面物点的反方向的移动, 其像点在焦面上的移动距离可由下式表出:

$$\Delta X = T_{\Phi} \times V_x \times f_B / H \tag{1}$$

式中 T_{Φ} 为相机曝光时间; V_x 为在 OX 方向的振动的线速度

f_B 为相机的后焦距; H 为航高

$m = H / f_B$ 被称为航空比例尺

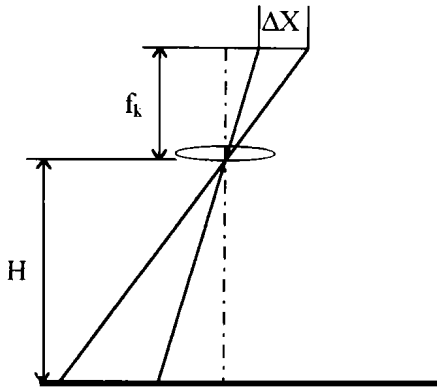


Fig 2 Displacement in X-axis

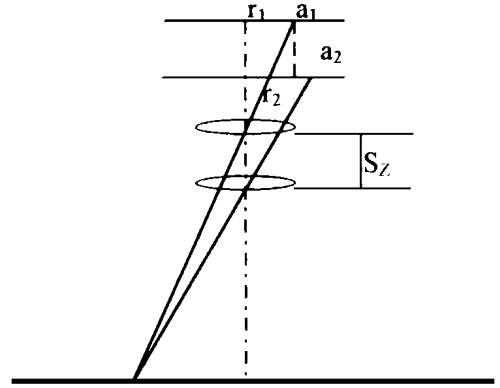


Fig 3 Displacement in Z-axis

图3表示了相机沿着 OZ 方向的移动时像点的变化, 在相机曝光开始时某物点成像 a_1 点, 其中心像点的距离为 r_1 ; 在曝光过程中航空相机移动了一段距离 S_z

$$S_z = V_z T_{\Phi} \tag{2}$$

式中: S_z 为 OZ 向移动距离

V_z 为航相机 OZ 振动速度

此时该物点成像于 a_2 点, 距离像面中心的距离为 r_2 ,

$$\Delta Z = r_2 - r_1$$

$$L = r_1 H / f_B$$

$$L = (H - S_z) (r_1 + \Delta Z) / f_B$$

两公式联立求解得到:

$$\Delta Z = S_z r_1 / (H - S_z)$$

因为 $H \gg S_z$ 可将上式近似为

$$\Delta Z = S_z r_1 / H = V_z T_{\Phi} r_1 / f_B (f_B / H)$$

$$\Delta Z = V_z (r_1 / f_B) T_{\Phi} / m \tag{3}$$

从上面的分析得出 OX 、 OY 方向上的线位移在整个像面内所造成的不清晰是一致的, 而 OZ 方向的线位移所造成的不清晰与像点到主光线的距离成正比, 其比例因子为 r_1 / f_B , 也就是相机镜头的半视场角的正弦值. 对于一般情况, 任意振动都可以分解成为各阶谐波振动的合

成, 所以用简谐振动来作为激励研究其响应可以得到其一般规律。当航空相机的固定点在相位、振幅相等时, 产生沿三个轴的线位移。

$$S = S_0 \sin(\omega t + \Psi)$$

$$V = dS/dt = \omega S_0 \cos(\omega t + \Psi)$$

把位移和速度在三个坐标轴代入(1)式、(3)式得到:

$$\Delta X = \omega T_{\Phi} S_{0x} / m \cos(\omega t + \Psi_X)$$

$$\Delta Y = \omega T_{\Phi} S_{0y} / m \cos(\omega t + \Psi_Y)$$

$$\Delta Z = \omega T_{\Phi} S_{0z} / m \times (r_1 / f_B) \cos(\omega t + \Psi_Z)$$

由于相机的曝光时间 T_{Φ} 小于扰动周期所以其极限值为:

$$\Delta X = \omega T_{\Phi} S_{0x} / m$$

$$\Delta Y = \omega T_{\Phi} S_{0y} / m$$

$$\Delta Z = \omega T_{\Phi} S_{0z} / m \times (r_1 / f_B) \quad (4)$$

2.2 角位移对像质的影响

当相机固定点的振动相位与振幅不一致时, 就会发生角位移, 同样认为绕 X 轴、 Y 轴的形式与规律是一致的, 故以 X 轴为例进行讨论。

$$\Psi_x = \Delta S_z / L$$

ΔS_z — Y 轴上两固定点 Z 向距离差, L — Y 轴上两固定点 Y 向距离差。

仍然以简谐振动的形式代入, 并且认为各个固定点上的振幅相同:

$$\Psi_x = \Delta S_z / L = \frac{S_z \sin(\omega t + \Psi_1) - \Psi S_z \sin(\omega t + \Psi_2)}{L}$$

当其相位 Ψ_1 、 Ψ_2 相差 180° 时 Ψ_x 最大:

$$\Psi_x = \frac{2S_z \sin(\omega t + \Psi_2)}{L_x}$$

同理可以得出:

$$\Psi_z = \frac{2S_x \sin(\omega t + \Psi_1)}{L_x} \quad (5)$$

对于振动而引起的相机转动其回转中心的位置是由相机座架与飞行器连接点的多少, 及其相对位置所决定的。为了便于讨论可认为三个轴的回转中心都通过相机的主节点, 这时相机的转动没有引起光学系统的主光轴平移, 转动量最大的反映到了像点在像面的位移, 故而认为此时转动影响最大。

如图 4 所示, 对于绕 X 轴、 Y 轴的转动

$$r = f_B \tan \beta$$

r —像点到光轴上像点的距离, β —物点的入射角。

写成全微分形式:

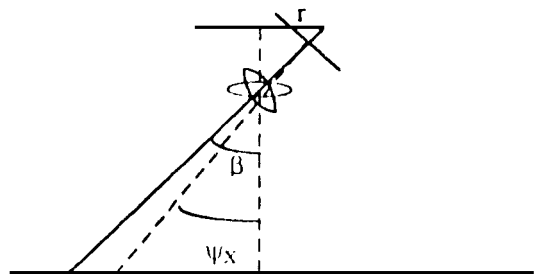


Fig. 4 Rotation about X -axis

$$dr = f_B / \cos^2 \beta \times d\beta$$

$d\beta$ 就是由于相机转动引起的

$$d\beta = d\Psi_x / dt \times dt$$

$$\cos^2 \beta = f_B^2 / (f_B^2 + r^2)$$

将(4)式代入可以求出在整个曝光时间 T_Φ 内像点移动距离:

$$\Delta r = \frac{f_B^2 + r^2}{f_B} \frac{2\omega_S z \cos(\omega t + \Psi_z)}{L} T_\Phi$$

$$T_\Phi < 2\pi / \omega$$

$$\Delta r_{\max} = \frac{f_B^2 + r^2}{f_B} \frac{2\omega_S z}{L} T_\Phi$$

对于绕 Z 轴的转动

$$dZ = r d\Psi_z$$

$$\Delta Z_{\max} = r(2\omega_S x / L_x) T_\Phi$$

假定各固定点的振幅都相等, 比较 Δr_{\max} 于 ΔZ_{\max}

$$\Delta r_{\max} / \Delta Z_{\max} = (f_B^2 + r^2) / f_B r \quad 2f_B r / f_B r = 2$$

可见相机绕水平轴转动的影响大于绕光轴的影响。把线位移与角位移比较

$$\Delta r / \Delta x = 2(f_B^2 + r^2) / f_B L \times H / f_B$$

$$= 2H / L \times [(f_B^2 + r^2) / f_B^2] \quad 2H / L$$

航高 H 远远大于固定点的距离 L , 所以角振动的影响大于线振动。

综上所述, 振动所引起的像质变化, 角振动大于线振动, 尤其是在垂直于光轴的平面内尤为严重。所以在设计减震器时, 应使航空相机不因飞机机体的振动而产生角振动, 并排除固定点线振动所引起的角振动。

3 某航空摄像机座架减震器的设计

3.1 该摄像机工作情况分析

为了达到最高的性能价格比, 应首先分析航空相机的工作环境, 了解各振动源的工作机理及其施加方式, 这样才能有的放矢地解决振动的问题, 达到设计要求。某新型航空摄像机, 直接装备在某直升机上, 其振动源主要有:

(1) 外部干扰

- (a) 由螺旋桨发动机组引起的飞机机体振动;
- (b) 飞行航线、航速、航高的急剧变化;
- (c) 各种天候情况及空气动力现象;

(2) 内部干扰:

- (a) 俯仰、偏摆电机工作所引起的振动;
- (b) 调焦电机所引起的振动;
- (c) 由于俯仰、偏摆、调焦等动作所引起的相机重心变化;

综观上述因素, 除了螺旋桨发动机组的振动干扰是永久性的, 而其他的的干扰源的影响都

是暂时性的。螺旋桨发动机组的振动对于航空相机座架固定点来讲其幅度和相位是一致的所以不能产生角位移,只产生线位移,其频率、振幅由发动机的转数来决定。对于其他的暂时性的干扰源,其作用形式和大小比较复杂,所以应在结构设计时考虑到这一因素,尽可能的隔离内部干扰源的影响,同时设计减震器,合理的选取阻尼系数和振幅放大率,尽快削减其他因素的影响,提高摄像机的成像质量。

3.2 该摄像机座架减震器的设计

根据设计要求及该摄像机的使用情况,采用四点固定、被动减震的方式,通过四个减震器与飞行器机体联结其布局如图(5)所示,其布局满足下列要求:

- (1) 固定点位于同一平面内,摄像机质量中心位于或近似位于该平面上。
- (2) 摄像机的质心应于各个固定点等距。
- (3) 四个减震器的负载能力相同,并且其总和应大于摄像机的总质量。

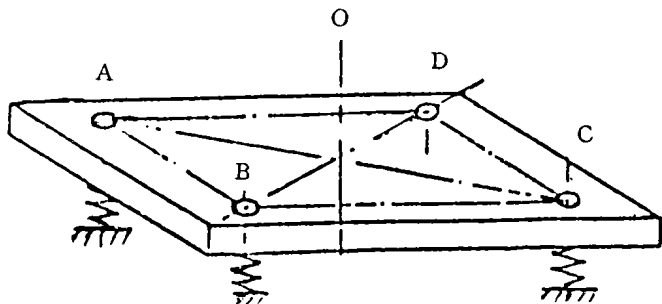


Fig 5 Mout position

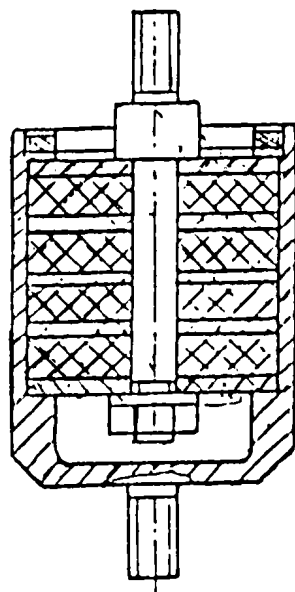


Fig 6 Damper structure

设计减震器形式如图(6)所示,振幅型号为JP2—8型,阻尼系数为0.2,适当的选取橡胶减震层的层数和预紧螺栓的预变形量使摄像机整机的固有频率为20 Hz

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{K/M} \quad (6)$$

对于振动源的激励在30 Hz到100 Hz其振幅衰减系数为

$$K = 1/\{[1 - (f/f_0)^2]^2 + \gamma^2(f/f_0)^2\}^{1/2} \quad (7)$$

式中 f —— 激励的频率, γ —— 阻尼系数。

K 为0.8到0.05,对于60 Hz的激励峰值振幅放大系数为0.1,将其3 g的振动峰值代入(4)式得到影响最大的X轴或Y轴的最大值为0.42 μm ,满足摄像机分辨率的要求。

4 结 论

航空机载光学设备,与地面设备相比较,其工作环境较为复杂,尤其是工作环境的振动问题,会直接影响到机载光学设备的成像质量,应在工程设计时充分考虑,从设计要求和使用环境入手,在满足设计指标的同时降低设计成本,达到事半功倍的效果。本文所论述的某航空摄像机的座架减震器的设计,就采用的这一原则,使用了结构简单、造价很低的减震器,并且在使用过程中取得了很好的效果,顺利的通过鉴定试验。

参 考 文 献

- [1] 勃劳希 J T. 机械震动和冲击测量 北京:机械工业出版社,1983
- [2] 李德葆 振动测量与试验分析 北京:国防工业出版社,1974
- [3] 振动与冲击手册编委会 振动与冲击手册 内部,1990
- [4] 谢尔巴科夫 航空照相机的设计与计算 内部,314

The V ibration Analysis And Damper Design of Optic Instrument in Flying Platform

Zhao Peng, Yang M u, Zhang Bao

(Changchun Institute of Optics and Fine M echanism ,
Chinese A cademy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The vibrational characteristics of the optic instruments in flying platform is discussed. The vibrational infection to its optic resolution is analysed, and the equation of vibration to displacement of image point is established. Meanwhile, a practice rule of mount damper design of these instruments is given and a design process of the damper of a new design aero-camera is demonstrated as a example.

Key words: Dampers, V ibrational characteristics, A irborne optical instrument

赵 鹏 男,1969年生,1990年毕业于中国人民解放军军械工程学院,并获得军用光学工程学士学位,1992年中科院长春光机所攻读硕士学位,现攻读博士学位,从事空间相机热分析研究,在《光学精密工程》《军械》等学术杂志上发表多篇学术论文。