

机载光电跟踪设备减震系统设计

苗用新^{1,2}, 张 堃^{1,2}, 郭 劲¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 减震系统采用“三点圆周均布”方式安装减震器, 限制光电跟踪设备在 X 、 Y 、 Z 轴方向上的转动。减震器采用减震材料加垫片形式作为减震腔填充结构, 简化了系统结构, 降低了制造、维修成本。最终, 通过适当选择减震参数达到光电跟踪设备精度要求。

关键词: 减震系统; 光电对抗; 机载设备

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2008)08-0442-04

Design of the Absorber System of the Airborne EO Tracing Equipment

MIAO Yong-xin^{1,2}, ZHANG Kun^{1,2}, GUO Jin¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, china;

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

Abstract: The “tri-point circumferential uniform distribution” used in the absorber system to assemble the absorbers, limits the angular displacement of X , Y and Z axis of the EO tracing equipment. Absorbing materials combined with shims are used for filling the absorbing chamber, it makes the structure of the system more sample, the manufacture and maintain cost cheaper. Finally, the absorber system satisfies the precision requirements of the EO tracing equipment by choosing suitable parameters.

Key words: absorber system; EO countermeasure; airborne equipment

引言

机载光电跟踪设备一般是以吊舱的形式装挂于作战飞机上, 它利用前视红外、电视、激光等光电传感器对地面目标进行搜索、识别、跟踪以及激光指示。空对地攻击时机载光电跟踪设备首先搜索、发现、识别目标, 当满足截获目标条件后手动或自动截获目标, 并实现设备自动跟踪目标^[1]。对机载设备来说, 其振动环境比较恶劣, 尤其对于机载光电跟踪设备, 各种振动经过弹性构件传递到设备基座, 从而引起设备环架和台体振动。设备环架、台体及惯性仪表和负载实际上是一个多自由度的弹簧-质量-阻尼系统, 因此当激励频率和系统的某阶固有频率相等时, 将引起共振^[2]。强烈的振动通过环架的不等刚度和质心偏移, 使陀螺仪产生漂移, 使视频图像模糊, 交变干扰力矩也会使陀螺仪产生过大的角运动, 影响平台稳定系统的工作。所有这些最终都会降低平台的跟踪精度, 甚至造成丢失目标。因此, 为了减小惯性仪表的误差, 提高平台的稳定精度和跟踪精度, 需要对设备安装专

门的隔振装置。

1 振动对跟踪精度的影响

1.1 振动源

分析光电跟踪设备的工作环境, 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。机载设备振动源主要包括: 外界干扰和内部干扰^[3]。

外界干扰: 载机发动机组产生的振动; 载机航线、速度、高度急剧变化产生的振动; 各种大气现象及空气动力现象, 相对航空相机窗口的空气流动和低频热动力现象引起的振动; 机炮发射时的撞击力以及外挂投放时产生的振动; 载机地面滑跑和地面牵引时产生的振动; 喷气发动机的高声强噪声以及机炮发射时的炮口爆炸波等产生的振动; 由于安装误差或者设备升降使得光电设备的重心和安装固定点不在同一个平面上产生的角振动等。

内部干扰: 航空相机内部的调光机构引起的振动; 航空相机的调焦与变倍引起的振动^[4]; 由于俯仰、

收稿日期: 2008-04-25

作者简介: 苗用新 (1982-), 男, 汉, 硕士, 助理工程师, 主要从事机载光电对抗方向研究。

基金项目: “十一五”预研项目

偏摆、调焦等动作引起航空相机的重心不固定产生的振动; 航空相机座架的摇摆产生的振动等。

1.2 线振动对跟踪精度的影响

为使问题分析简化, 将航空相机载体在空中的航行速度假设为零, 这样的假设基于航速引起的成像质量降低可由像移补偿装置来解决。建立直角坐标系如下: 航空相机光学系统镜头为坐标原点, 光轴方向为 Z 轴, 把振动分解为沿 3 个坐标轴的基本运动, 即绕 3 个轴的转动加沿 3 个轴的平动^[5], 如图 1 所示。这些运动的结果使被摄取的物点曝光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使得像质下降。图 2 所示为沿 X 向线振动对像质的影响。

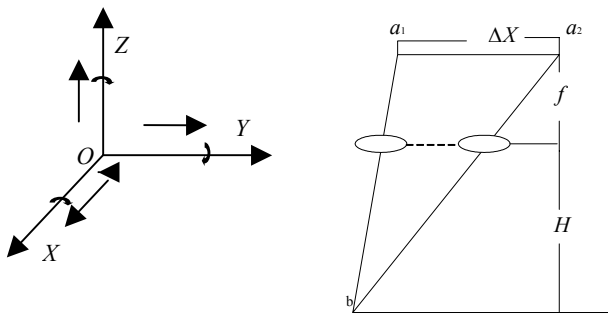


图 1 振动在坐标系下的分解

图 2 沿 X 轴线振动分析

Fig.1 Motion in coordinate.

Fig.2 Motion in X-axis

航空相机的复合运动中包含三种线位移, 即沿 OX 向、 OY 向、 OZ 向的平动。由坐标系的建立可知光轴方向与光轴重合, 认为 OX 向、 OY 向的光学系统是对称的, 其运动规律是一致的, 航空相机在 OX 方向的移动, 其像点在焦面上的移动距离可表示为:

$$\Delta X = T_{\phi} \times V_X \times f / H \quad (1)$$

式中: ΔX 为像点在焦面上移动的距离; T_{ϕ} 为相机曝光时间; V_X 为沿 OX 方向振动的线速度; f 为相机后焦距; H 为航高; $H/f = M$ 为航空比例尺。

图 3 给出了相机沿 OZ 方向移动时像点的变化, 在相机曝光时某物成像于 a_1 点, 距中心像点的距离为 r_1 , 在曝光过程中相机移动的距离为:

$$S_Z = V_Z \times T_{\phi} \quad (2)$$

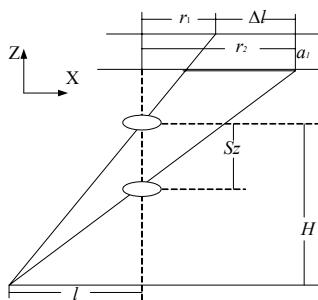


图 3 沿 Z 轴线振动分析

Fig.3 Motion in Z-axis

式中: S_Z 是 OZ 向移动的距离; V_Z 是相机沿 OZ 向振动的线速度。图 3 所示为沿 Z 向线振动对像质的影响。

此时该物点成像于 a_2 点, 距中心像点的距离为 r_2 :

$$\begin{cases} \Delta l = r_2 - r_1 \\ l = \frac{r_1 H}{f} \\ l = \frac{(H - S_Z) r_2}{f} = \frac{(H - S_Z)(r_1 + \Delta l)}{f} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为物点距中心像点的距离; Δl 为 OZ 方向振动影响下像点在 OX 向移动的距离。这里需要说明的是, 本文研究的是沿 OZ 向振动在整个相面 (OX 面) 内对像质的影响, 并非 OZ 向振动本身, 所以 Δl 为 OX 向距离, 而非 OZ 向距离。于是有:

$$\Delta l = \frac{S_Z r_1}{H - S_Z} \quad (4)$$

考虑 H 远大于 S_Z , 上式近似为:

$$\Delta l = \frac{S_Z r_1}{H} = \frac{V_Z T_{\phi} r_1}{f} \cdot \frac{f}{H} = V_Z \cdot \frac{r_1}{f} \cdot \frac{T_{\phi}}{M} \quad (5)$$

根据振动理论, 一般情况下的振动都可以被分解成各阶简谐振动的合成, 所以可将振动问题简化为简谐振动。当相机的固定点在相位、振幅相等时, 产生沿 3 个轴的线位移:

$$\begin{cases} S = S_0 \sin(\omega t + \psi) \\ V = \frac{dS}{dt} = \omega S_0 \cos(\omega t + \psi) \end{cases}$$

将位移和速度分别在 3 个坐标轴向代入式(1)和式(5)有:

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{\omega T_{\phi} S_{OX} \cos(\omega t + \psi_X)}{M} \\ \Delta Y = \frac{\omega T_{\phi} S_{OY} \cos(\omega t + \psi_Y)}{M} \\ \Delta Z = \frac{\omega T_{\phi} S_{OZ} \cos(\omega t + \psi_Z)}{M} \end{cases} \quad (6)$$

由于相机的曝光时间远小于扰动周期, 所以将式(6)简化为:

$$\begin{cases} \Delta X = \frac{\omega T_{\phi} S_{OX}}{M} \\ \Delta Y = \frac{\omega T_{\phi} S_{OY}}{M} \\ \Delta Z = \frac{\omega T_{\phi} S_{OZ}}{M} \cdot \frac{r_1}{f} \end{cases} \quad (7)$$

比较相机绕 OZ 轴与 OX 轴线振动的影响, 有:

$$\frac{\Delta l}{\Delta X} = \frac{r_1}{f} = \tan \beta \leq 1$$

取相机镜头半视场角 β 为 5° , $\Delta l/\Delta X=0.087$ 。所以, 仅考虑线振动时, 光轴平动对像质的影响小于另外2个方向平动。

1.3 角振动对像质的影响

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 Y 轴为例进行讨论。

$$\Delta \psi_Y = \Delta S_Z / L$$

式中: ΔS_Z 是 X 轴上2固定点 Z 向距离差, L 为 X 轴上2固定点 X 向距离差。

为使问题简单化, 仍考虑简谐振动, 并且认为各个固定点上的振幅相同:

$$\Delta \psi_Y = \frac{\Delta S_Z}{L} = \frac{S_Z \sin(\omega t + \psi_{Y1}) - S_Z \sin(\omega t + \psi_{Y2})}{L}$$

当其中相位 ψ_{Y1} 、 ψ_{Y2} 相差角度为 π 时取得极大值:

$$\Delta \psi_Y = \frac{2S_Z \sin(\omega t + \psi_{Y1})}{L} \quad (8)$$

同理可得:

$$\Delta \psi_Z = \frac{2S_Y \sin(\omega t + \psi_{Z1})}{L} \quad (9)$$

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3个轴的回转中心都通过相机的镜头, 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, 故认为此时转动影响最大。图4为绕 Y 轴转动情况。

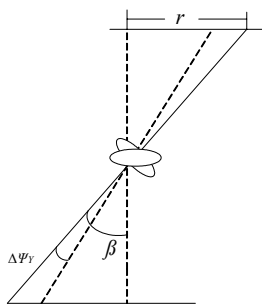


图4 绕 Y 轴扭转分析

Fig.4 Torsion in Y-axis

图4中: $r=f \times \tan \beta$ 。此式微分有: $dr = \frac{f}{\cos^2 \beta} d\beta$ 。

产生 $d\beta$ 的原因正是由于相机的转动即角振动:

$$d\beta = \frac{d\psi_Y}{dt} dt$$

$$\cos^2 \beta = \frac{f^2}{f^2 + r^2}$$

将式(8)代入可以求得整个曝光时间 T_Φ 内像点的移动距离:

$$\Delta r = dr = \frac{f^2 + r^2}{f} \cdot \frac{2\omega S_Z \cos(\omega t + \psi_{Y1})}{L} T_\Phi$$

又因为 T_Φ 远小于 $2\pi/\omega$, 对于绕 Z 轴的转动:

$$dZ = r d\psi_Z$$

$$\Delta Z_{\max} = r T_\Phi \frac{2\omega S_Y}{L}$$

假定各固定点的振幅都相等($S_Y=S_Z$), 比较 Δr_{\max} 和 ΔZ 。

$$\Delta r_{\max} = \frac{f^2 + r^2}{f} \cdot \frac{2\omega S_Z}{L} T_\Phi$$

$$\frac{\Delta r_{\max}}{\Delta Z_{\max}} = \frac{f^2 + r^2}{fr} \geq \frac{2fr}{fr} = 2 \quad (10)$$

所以, 仅考虑角振动时, 绕水平轴转动对像质的影响大于绕光轴转动。

把相机绕水平轴转动和平动的最大位移进行比较, 并且考虑相机镜头的半视场角为 5° , 有:

$$\frac{\Delta r_{\max}}{\Delta X} = \frac{2(f^2 + r^2)}{fL} \cdot \frac{H}{f} \geq \frac{2H}{L} \quad (11)$$

综上所述, 仅考虑线振动, 沿光轴方向平动对像质的影响小于另外两个方向平动, 可以忽略不计; 仅考虑角振动, 绕水平轴转动对像质的影响大于绕光轴转动; 综合考虑线振动和角振动, 角振动所引起的像质变化大于线振动, 尤其是在垂直于光轴的平面内尤为严重。所以在设计减振系统时, 主要应考虑使航空相机不因载机机体的振动而产生角振动, 并考虑线振动的隔离, 此外, 还应注意排除固定点线振动所引起的角振动。

2 减震系统设计

为了有效减小振动对光电跟踪设备, 尤其是对航空相机成像质量的影响, 设计减震系统结构框架如图5所示。稳定的三角结构, 抑制了载机振动对光电跟踪设备造成的角位移。对于该系统还应满足: 三个支撑减震器的固定点安装在同一平面内, 且光电跟踪设备质心与该平面近似在一个平面内, 并与各支撑减震器固定点等距(如图5中坐标系所示位置); 支撑减震器以环形均匀固定在支撑盘上, 且各支撑自然长度和减震系数均相等。

减震器设计如图 6，为方便维护护理，将减震器外壳设计腔体和端盖两部分，这样可以方便装卸减震器来维修更换减震材料或垫片；减震材料被分层填充减震器内腔，并用金属垫片分隔各个减震层，从而提高减震腔内系统的刚度的，减少应力集中。

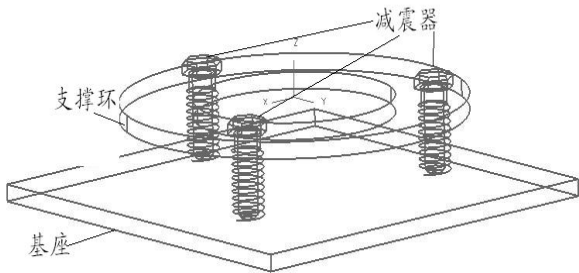


图 5 减震系统结构示意图
Fig.5 The general view of the absorbing system

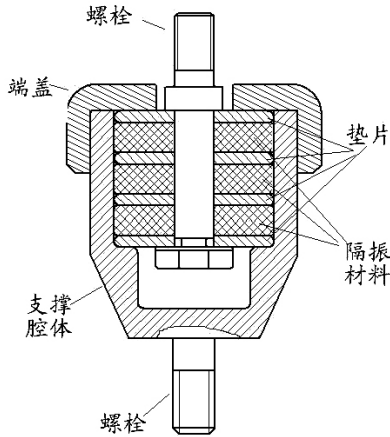


图 6 减震器结构

Fig.6 The structure of the absorber

某型直升机上光电跟踪设备的振动环境参数为：振动源激振频率为 30~100 Hz，振动加速度 3 g。通过计算机仿真得到系统的减震性能参数如图 7 和图 8 所示：

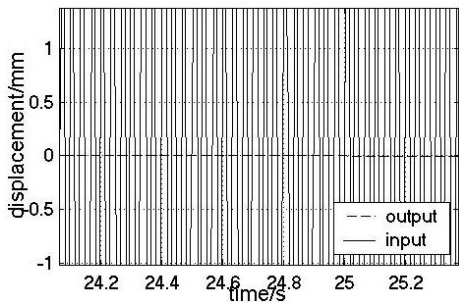


图 7 正弦输入下仿真结果
Fig.7 The simulating result of sine signal

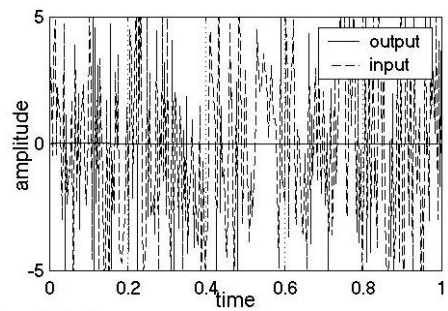


图 8 随机信号下仿真结果

Fig.8 The simulating result of random signal

如图 7 所示，在输入频率为 60 Hz，峰值为 6 mm 的正弦振动信号时，减震后光电跟踪设备的最大位移小于 0.3 μm ；如图 8 所示，在输入频率为 60 Hz，峰值为 6 mm 的随机信号时，减震后光电跟踪设备的最大位移为 0.5 μm 。系统设计满足光电跟踪设备分辨率精度要求。

3 结论

- 1) 减震系统中减震器采用三角形圆周均布设计，消除沿 X、Y、Z 轴转动引起的光电跟踪设备精度误差；
- 2) 通过改变减震器螺栓预紧力，可以方便调节系统固有频率，避免产生共振；
- 3) 适当选择减震材料，可以调节减震系统精度；
- 4) 减震器采用减震材料加垫片的结构来填充支撑腔体，降低生产成本，同时降低维修成本。

参考文献：

[1] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 82-88.

[2] 付芸, 徐长吉, 丁亚林. 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6): 550-554.

[3] 梅德庆, 陈子辰. 微制造平台的精密隔振系统研究[J]. 光学精密工程, 2001, 9(6): 506-510.

[4] 沈宏海, 刘晶红, 贾平. 摄像稳定技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 115-120.

[5] 金光, 王家骥, 倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 89-94.