

机载光电吊舱隔振系统研究综述

董万元

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 主要从振动对光电设备成像的影响和无角位移隔振设计两个方面, 综述了近年来国内外学术界对机载光电设备的隔振设计方法和技术。提出角振动较线振动对光电吊舱成像质量的影响大, 光电吊舱隔振设计需重点考虑降低角振动问题。引起设备角振动的重要因素为光电设备的质心与隔振系统的刚度中心相偏离, 以及各隔振器之间的刚度和阻尼不匹配, 隔振系统设计时应予以关注。

关键词: 光电吊舱; 隔振系统; 角振动; 无角位移隔振

中图分类号: O328

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0020-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.004

Research Review on Vibration Isolation System of Airborne Optoelectronic Pods

DONG Wan-yuan

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: This paper reviews new worldwide advances of vibration isolation method for airborne opto-electronic pod in recent years, mainly from the influence of vibration for the imaging quality of the optoelectronic device and the method of irrotational displacement isolation for airborne optoelectronic pod. It proposes that the angular vibration has more influence on the imaging quality of the pod than the linear vibration, and the vibration isolation design of the pod should focus on reducing the angular vibration. The important factors causing the angular vibration of the equipment are the deviation between the mass center of the photoelectric equipment and the stiffness center of the vibration isolation system, and the mismatch between the stiffness and damping of the vibration isolators that should be paid attention to in the design of vibration isolation system.

KEY WORDS: opto-electronic pod; vibration isolation system; angular vibration; irrotational displacement isolation

光电吊舱是以无人机、直升机或预警机等作为载体, 利用光电吊舱内成像系统对地面目标进行搜索定位、识别跟踪、导航指引及动态监视等, 获取地面目标的清晰图像, 以供侦查、作战分析或远程打击。光电吊舱的内部集成了用于成像的多种光学元件, 除光学镜头等光电部件的自身质量会影响成像效果外, 光

电设备载体的结构振动成为影响其成像质量的主要因素^[1]。振动引起图像模糊的原因是由于成像系统相对于飞机的转动以及目标相对于成像系统的运动。在动态成像曝光时间内, 若成像点相对于传感器发生移动, 像移部分虽然可以通过成像算法消除, 但残留的像移影响却无可避免, 于是就导致了图像模糊^[2]。

收稿日期: 2019-07-15; 修订日期: 2019-07-26

Received: 2019-07-15; Revised: 2019-07-26

作者简介: 董万元 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为结构振动控制。

Biography: DONG Wan-yuan (1986—), Male, Master, Engineer, Research focus: structural vibration control.

引文格式: 董万元. 机载光电吊舱隔振系统研究综述[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 020-026.

DONG Wan-yuan. Research review on vibration isolation system of airborne optoelectronic pods[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 020-026.

机载光电吊舱受到的振动主要包括机体结构振动和光电吊舱自身扰动。机体结构振动主要是由发动机运转、外部气流扰动、机动飞行以及螺旋桨转动等引起的外部振动。机体结构振动的特点是频率带宽较宽、振动量级大，涵盖了频率从 5~2000 Hz 的不同量级的振动^[3]，对光电设备成像质量的影响十分严重。光电吊舱自身振动即光学系统内部的调焦、变倍机构旋转引起的振动，以及相机的重心不固定和摄像机座架摇摆产生的振动等。自身扰动的特点是引起的振动较小，但是对成像质量的影响却不可避免。由此可知，无论是外部振动还是自身扰动，都将直接或间接地对光电系统的成像质量、稳瞄精度和光电器件的使用寿命、可靠性等产生不利影响^[4]。虽然目前光电吊舱伺服稳定系统带宽可以做到 25 Hz 左右，对系统带宽以内的振动扰动可由伺服稳定系统来消除，但是对系统带宽以外的高频振动扰动，必须对光电吊舱进行隔振设计来减小载机的振动载荷对光电吊舱造成的不利影响，从而提高机载光电吊舱成像系统的清晰度、分辨能力以及瞄准精度等。

传统的机载设备没有精度控制要求，常采用 4 个或 6 个金属或橡胶减振器直接与载机连接。由于设备的重心高于隔振安装点，这种支撑方式会带来严重的俯仰角振动。文献[5]指出最大角振动可达 144"，这个量级将导致成像模糊。例如机载激光瞄准器距离靶标 400 km，若要使激光瞄准点的瞄准误差控制在 0.5 m 以内，则控制镜的角指引精度就需要控制在 10^{-6} rad 量级^[6]。文献[7]中分析表明，线振动振幅为 1 mm 的影响和物体相对于飞机上的 CCD 探测器产生的像移都可忽略不计，并且传递函数很高，而角振动影响却非常大，传递函数很低，角振动的振幅为 30" 产生的像移是线振动振幅为 1 mm 时产生像移的 436 倍。因此角振动对成像质量的影响比线振动大得多，角振动会严重影响光电吊舱的成像质量。

因此机载光电吊舱隔振设计较电子设备有所不同，除对隔振系统的频率要求较低之外，通常隔振系统的频率低于 30 Hz，更主要的是能够抑制光电吊舱的角位移振动。因此，如何消除角振动成为光电吊舱隔振设计的中中之重。本文的目的是综述近年来国内外学者对机载光电设备的隔振设计方法和技术，以及隔振安装形式，从振动对光电设备成像的影响分析和无角位移隔振设计方法两个方面进行综述。

1 振动对光电设备成像的影响

光电吊舱结构质量的不平衡以及在内外扰力的作用下，将不可避免地导致光电设备内部元件的振动，使光路传输发生偏转，从而使得光电系统的图像

不清晰。文献[7-8]中从光路成像原理分析了线性振动和角振动对光电吊舱成像质量的影响，分析方法如图 1 和图 2 所示，其结论是角振动对成像质量的影响比线性振动大得多。究其原因在于光电吊舱的镜头距离跟踪目标的距离达几公里甚至几十公里，镜头的角振动所产生的图像位移量远大于线性振动所产生的图像位移量。

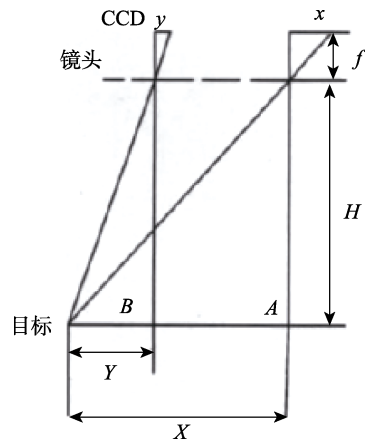


图 1 线性振动示意

Fig.1 Schematic diagram of linear vibration

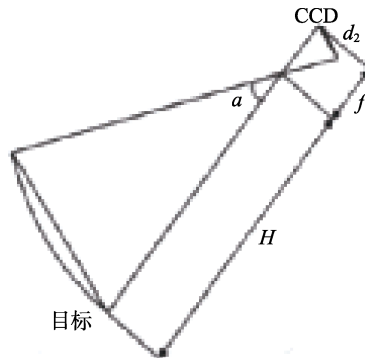


图 2 角振动示意

Fig.2 Schematic diagram of angular vibration

军械工程学院的李玉龙等人^[9]认为，光学系统的振动与物体空间六自由度系统类似，可分解为三轴平动和绕三轴转动。于是利用几何分解方法将角振动进行分解，可等效成像点相对于像面的线振动，如图 3 所示。建立角振动参数与像点相对于像面的线振动参数的关系式，再通过分析纵向、横向的高频、低频线振动对光学系统 MTF 的影响，推导出线振动参数与 MTF 的量化关系式，得到对应的角振动参数对系统 MTF 影响的量化关系，进而研究光电平台的角振动对光学成像系统传递函数 (MTF) 的影响。研究结果表明，高频角振动时，振动频率对调制传递函数的影响较小，振幅影响较大，振动幅值越大，调制传递函数减小越快，图像质量下降也越快。低频角振动时，角振动幅值对图像质量影响较大，要保证角振动的幅

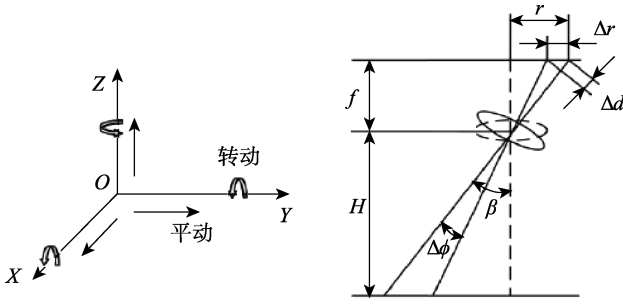


图3 角振动分解原理

Fig.3 Schematic diagram of angular vibration decomposition

值在允许的范围内,可通过缩短曝光时间来增加有效的分辨率。

经分析,角振动较线振动对光电吊舱成像效果的影响大,光电吊舱的隔振设计必须考虑系统的角振动问题,尽可能减小系统的角振动,角振动控制问题成为制约光电吊舱隔振设计发展的因素。为了能更好地抑制角振动,很有必要探讨隔振系统角振动产生的原因,并对其进行有效的分析。

2 隔振系统的角振动分析

要分析被隔振设备的角振动,则需建立隔振系统的动力学模型,求解被隔振设备的运动方程。为了研究方便,假设光学设备仅承受平面内垂向 y 的振动激励,以设备的质心为坐标原点 o ,于是光学设备的运动表现为质心沿坐标轴的平动 y 和设备绕 z 轴的转动 θ_z 。建立光学设备平面内的两自由度隔振模型,见图4,设备的质量为 m ,设备绕 z 轴的转动惯量为 J_z ,减振器1、2的垂向刚度为 k_1 、 k_2 ,阻尼为 c_1 、 c_2 。依据牛顿运动定律,应用拉格朗日方程可以得到隔振系统简化后的振动控制方程为:

$$\begin{bmatrix} mS^2 + (c_1 + c_2)S + k_1 + k_2 & (c_2b - c_1a)S + k_2b - k_1a \\ (c_2b - c_1a)S + k_2b - k_1a & J_zS^2 + (c_1a^2 + c_2b^2)S + k_1a^2 + k_2b^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y(S) \\ \theta(S) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Y_0(S)[(c_1 + c_2)S + k_1 + k_2] \\ Y_0(S)[(c_2b - c_1a)S + k_2b - k_1a] \end{Bmatrix} \quad (2)$$

令方程(2)中 $X_1 = mS^2 + (c_1 + c_2)S + k_1 + k_2$, $X_2 = (c_2b - c_1a)S + k_2b - k_1a$, $X_3 = J_zS^2 + (c_1a^2 + c_2b^2)S + k_1a^2 + k_2b^2$, $X_4 = (c_1 + c_2)S + k_1 + k_2$, 于是垂向振动和俯仰振动的传递函数分别为:

$$G_1(S) = \frac{Y(S)}{Y_0(S)} = \frac{X_3X_4 - X_2^2}{X_1X_3 - X_2^2}, \quad G_2(S) = \frac{\theta(S)}{Y_0(S)} = \frac{X_1X_2 - X_2X_4}{X_1X_3 - X_2^2} \quad (3)$$

从隔振系统的传递函数(3)可知,垂直 y 向与绕 z 轴的转动相互耦合。即使只有垂向 y 的平动扰动,也会引起设备绕 z 轴转动的俯仰角振动。如果能使得减振器的刚度和阻尼满足关系:

$$k_2b - k_1a = 0 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & c_2b - c_1a \\ c_2b - c_1a & c_1a^2 + c_2b^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & k_2b - k_1a \\ k_2b - k_1a & k_1a^2 + k_2b^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & c_2b - c_1a \\ c_2b - c_1a & c_1a^2 + c_2b^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & k_2b - k_1a \\ k_2b - k_1a & k_1a^2 + k_2b^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

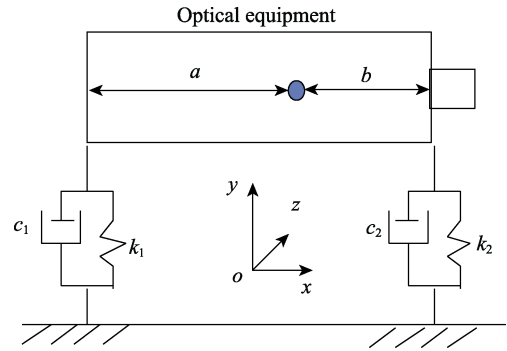


图4 隔振系统动力学模型

Fig.4 Dynamics model of vibration isolation system

方程(1)中 $\dot{y}_0$ 、 y_0 分别为基础垂向的速度和位移扰动,且忽略基础的转动角扰动。该系统垂向振动的固有频率 ω_1 和绕 z 轴的俯仰振动的固有频率 ω_2 分别为:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 k_2}{J_z}}$$

设方程(1)所有变量的初始条件为0,经拉普拉斯变换并整理后,可得传递函数方程为:

$$c_2b - c_1a = 0 \quad (5)$$

即1#、2#减振器的刚度比和阻尼比均等于重心到各自安装支撑点的距离之比的倒数,于是可以使方程(1)解耦,消除垂向 y 的平动与绕 z 轴转动之间的耦合振动。由此可知,设备的质心与隔振系统的刚度中心偏离,以及两隔振器的刚度和阻尼不匹配是引起设备俯仰角振动的重要因素。

3 光电吊舱隔振设计

机载光电吊舱隔振安装是通过在机体与吊舱之间安装减振器,以降低机体振动向吊舱的传递,从而提高吊舱的成像效果。橡胶减振器具有安装形式多样、质量轻、减振效果好等优点。刘家燕等人^[10]设计

的橡胶减振器在机载光电吊舱上得到成功应用,其缺点是不耐腐蚀、刚度受温度影响,因此应用范围仍然受到限制。于是又展开钢丝绳减振器、金属摩擦减振器、金属丝网减振器和金属橡胶减振器等金属减振器在光电设备上的应用研究,隔振系统的频率可以设计到 10~30 Hz,隔振效果优异,而且环境适应性较橡胶减振器强,因此成为光电吊舱减振设计的良好选择。法国 Hutchinson 为 EC135 直升机的光电吊舱设计的隔振系统如图 5 所示,固有频率为 10 Hz 左右,隔振器为金属丝网隔振器,采用平面内四点支撑的布局形式,由于结构布局简单,因此在机载光电吊舱上得到广泛的应用。当前国内的很多机载光电吊舱也采用这种安装形式,包括洛阳的 612 所、613 所、兵器 205 所等。

平面四点安装的隔振系统的缺点也是比较明显的,由于重心与刚度中心的偏离,带来的角振动问题比较明显,因此这种结构对于提高光电吊舱的成像质量有限。近年来学者们提出了光电吊舱的多种隔振安装形式,包括无角振动隔振系统的设计方法等,并进行了理论与试验的研究。

中国空间技术研究院的李创等人^[11]依据平行四边形原理,利用金属丝网隔振器设计了一种无转角的

隔振平台,其样机模型如图 6 所示。该装置可以有效隔离由光电吊舱载体引起的 20 Hz 以上的振动,采用双平行四边形结构设计,使隔振器只能沿 x 、 y 、 z 方向平动,而不产生转角,从而消除了隔振器转角位移对光电吊舱测角精度的影响,解决了隔振与精度之间的矛盾。该隔振装置设计需要保证较高的装配精度,并且可能发生卡死现象,降低隔振效果。

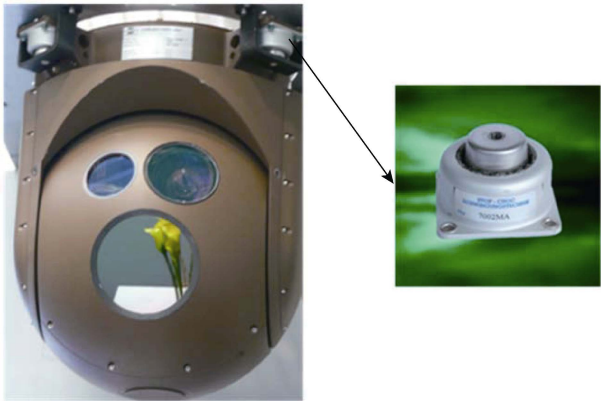


图 5 EC135 直升机光电设备隔振图
Fig.5 Photo of vibration isolation for EC135 helicopter's photoelectric equipment

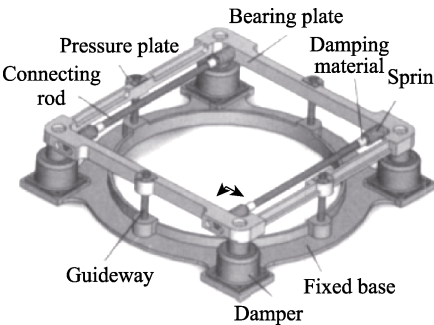


图 6 无转角隔振平台
Fig.6 Vibration isolation platform without angle

东北电子技术研究所的赵洪阳^[12]利用钢丝绳与高阻尼硅橡胶相组合的缓冲装置和线位移装置设计了一种三维减振系统,其结构如图 7 所示。隔振缓冲装置设计主要是兼顾隔振效率与缓(抗)冲效率对设备的影响,使设备在 3 个方向上实现有效的减振和缓

冲效果。线位移装置的设计原理仍然是利用平行四边形对边始终保持平行的原理来消除承载平台的角振动,使设备在 3 个平动自由度上实现线振动。文中叙述了隔振系统能够隔离掉 30 Hz 以上的振动,但未对角振动的抑制能力进行具体说明。

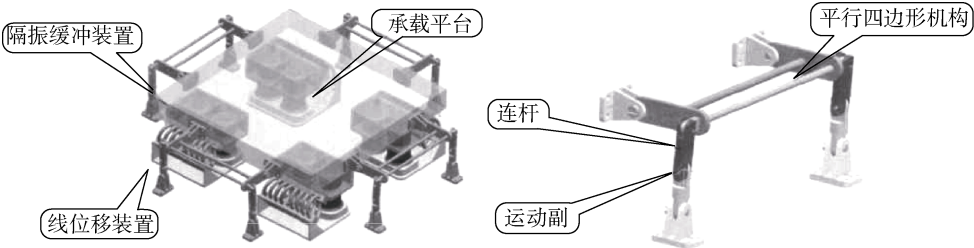


图 7 无角振动隔振平台及线位移装置
Fig.7 Vibration isolation platform without angle and line displacement device

军械工程学院的白鸿柏^[13-14]等人利用金属橡胶设计无转角的内、外隔振器,内隔振器只能提供沿 x 和 y 方向平动,而沿 z 轴平动、转动,绕 x 和 y 轴转动都被限制;外隔振器的中轴沿 z 轴向上运动时,上侧金属橡胶件受压,并且中轴与上盖和下盖存在着圆周同时接触滑移副的情况,这迫使中轴只能沿着 z 轴作平动,所有转动自由度被限制。采用这种隔振器对二轴四框架光电平台进行二级隔振设计,其模型如图8所示。一级隔振是在基座与光电平台

间安装外隔振器,共4个,对称布置,外隔振器限制平台外框架只能沿 z 轴运动。二级隔振是在内、外框架间安装内隔振器,共8个。为降低耦合程度,将内隔振器相对内框架重心对称布置,内隔振器限制平台内框架只能沿 x 轴和 y 轴运动。这种隔振方案的优点是平台只能沿3个轴向做平移运动,不能做角运动,实现了无角位移隔振设计,而且还可以实现三向等刚度。该隔振系统能够隔离掉20 Hz以上的振动,最大角位移为 $5.5''$ 。

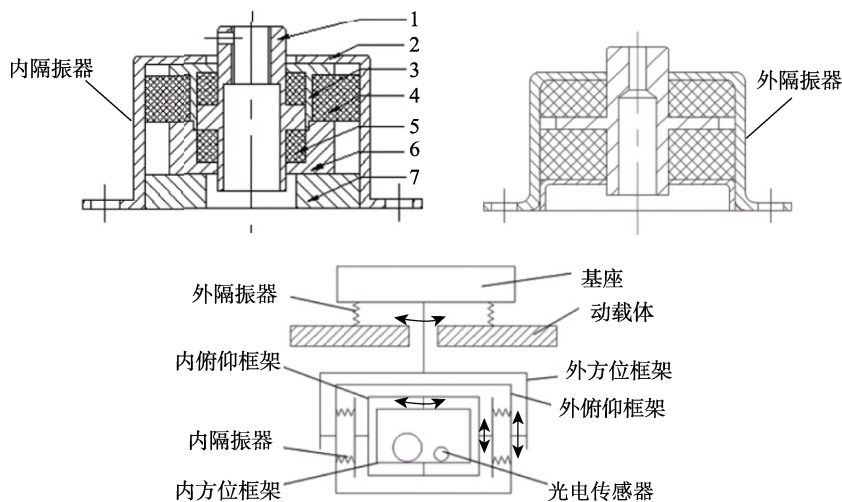


图8 内、外隔振器及二级隔振设计示意图

Fig.8 Design diagram of internal and external vibration isolators and secondary vibration isolation

中国科学院光电技术研究所的姜伟伟等人^[15]采用碗式橡胶减振器,在光电设备的8个角点分别布置减振器,减振器一端与光电设备的安装点连接,另一端连接到飞机上,构成一种8点支撑隔振系统,其结构如图9所示。这种隔振方案结构简单易行,由于橡胶减振器可以设计达到三向等刚度,因而隔振系统也具有三向等刚度的特性,隔振系统的频率可设计到30 Hz左右,目前这种隔振设计方式在航空613所的光电吊舱上得到应用。该隔振设计相对简单,但是抑制角振动的能力有限,在不平衡力和偏转力矩的作用下还是会产生角振动。

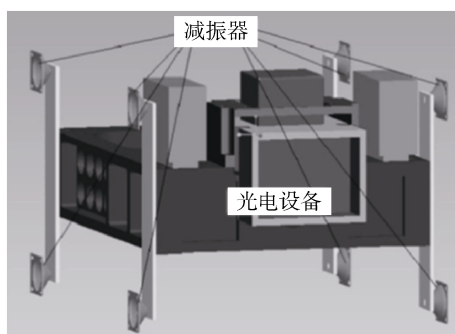


图9 8顶点隔振设计方案示意图

Fig.9 Schematic diagram of eight point vibration isolation system

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的杨剑锋等人^[16]设计了一种基于Stewart构型的隔振系统,用于空间相机的隔振平台,如图10所示。它主要由上、下安装面,6个单向隔振杆及12个球形铰链连接而成,单向隔振杆为液体阻尼器,也可以是其他单向隔振结构。平台的优点是具有六自由度的振动隔离能力,油液阻尼器的频率可以设计得很低,从而实现低频隔振。其缺点是油液的密封性低,使用久了容易发生漏油污染。该平台的平移运动和转动运动难以解耦,很容易引起被隔振设备的俯仰或转动等角振动,从而降低光电设备的成像质量。此外平台附加质量较多,因此目前该平台在飞机上应用得较少。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的

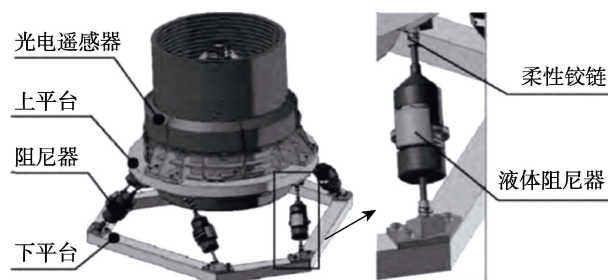


图10 Stewart 隔振平台

Fig.10 Stewart vibration isolation platform

杜言鲁等人^[17]通过对光电平台隔振系统的振动耦合进行分析,得出减振器刚度、阻尼参数偏差以及减振器布局不合理会使得载机的线振动耦合为光电平台的角振动,从而提出减小光电平台隔振系统振动耦合的一些方法。一是根据光电平台稳像系统的伺服带宽,确定隔振系统的固有频率,并设定线振动和角振动的固有频率相等,线振动固有频率用于确定减振器刚度,角振动固有频率用于确定减振器间的安装间距,根据视轴稳定系统主动补偿的幅值范围,确定隔振系统的阻尼比;二是隔振系统安装过程中,要测量平台重心位置,通过合理选择和布局减振器,保证平台质心位于安装平面内,而且阻尼器选择可调式阻尼器,以便调整隔振系统的阻尼系数,使得隔振系统各参数间尽量满足无角振动时的量化关系,减小或避免振动耦合。

大连交通大学的董海波等人^[18]采用层叠橡胶隔振器(图 11)作为机载光电吊舱的隔振器,并研究了这种隔振器的设计方法。这种隔振器的特点是轴向刚度大,侧向剪切刚度小,在电子机柜和建筑桥梁隔振领域得到广泛的应用,也可用于直升机螺旋桨根部的阻尼器,但是目前尚未见到该隔振器在机载光电吊舱上安装应用。

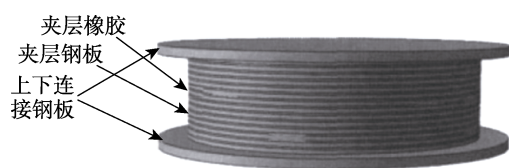


图 11 层叠橡胶隔振器
Fig.11 Laminated rubber isolator

华中光电技术研究所的曾垂峰等人^[19]研究了一种新型光电吊舱内框架的 6 自由度隔振系统,如图 12 所示。实质就是在吊舱内框架两侧安装类似 Stewart 平台的隔振系统,见图 12 中方框部分,隔振元件呈锥形布置,共安装了 16 个隔振元件,能够隔离 6 自由度方向 20 Hz 以上的振动。该结构的优点是可以衰减球头舱三轴向的角振动,从而降低光学元件

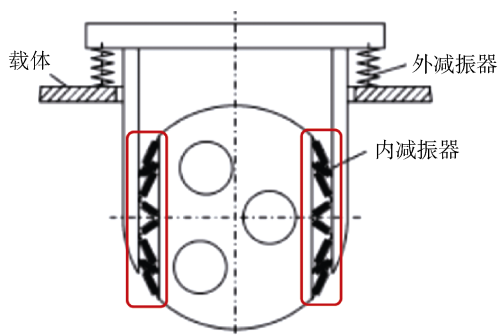


图 12 光电吊舱内框架隔振系统
Fig.12 Vibration isolation system of optoelectronic pod inner frame

的角振动,提高成像质量。缺点是附加隔振元件太多,增加了设备质量,需要增加更多的安装空间,不便于装配。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的孙辉等人^[20]设计了机载光电吊舱的主被动一体隔振系统,如图 13 所示。考虑光电吊舱内部的柔性连接结构,采用 LOG 算法设计控制器,通过对光电隔振系统的分析表明,该主被动一体隔振系统可以减小光电载荷柔性体内部的相对运动,即增大系统的内部阻尼,增加共振区的隔振效果,从而提高了光电吊舱的成像质量。主动控制系统可以实时监测吊舱的振动情况,根据反馈对吊舱的振动进行控制,隔振控制效果较被动控制好得多。但是主动控制设备需要提供能源,从而增加了系统的质量,不利于在飞机上使用。

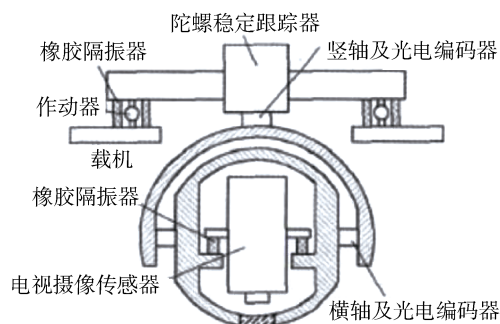


图 13 光电吊舱主被动一体隔振系统
Fig.13 Active and passive integrated vibration isolation system for optoelectronic pod

4 结论

1) 角振动较线振动对光电吊舱成像质量的影响大,光电吊舱隔振设计需重点考虑降低角振动问题。

2) 光电设备的质心与隔振系统的刚度中心相偏离,以及各隔振器之间的刚度和阻尼不匹配,是引起设备角振动的重要因素,隔振系统设计时值得关注。

3) 上述无角振动的隔振系统在一定程度上可以限制光电设备的角位移振动,从而提高成像质量,但是其尺寸庞大、质量较重,会给光电吊舱带来很大的附加质量,并且存在卡死的可能,降低隔振系统的可靠性。

4) 主-被动一体化隔振系统,增加的主动控制环节能够大大提高减振效果,但是由于需要附加能源设备,增加了飞机的负载,因此当前很少在飞机上采用,但是主-被动一体化隔振系统仍具有发展潜力,毕竟能够极大地提高光电吊舱的成像质量。

随着成像距离的不断增加,以及对成像质量的要求不断提高,光电设备的设计还会面临很多挑战。精密光电设备的成像质量每前进一步,都代表着科技的一大进步,而振动是影响其成像的关键因素,精密光

电吊舱的振动控制技术还有很长的路要走。

参考文献:

- [1] 王平, 张国玉, 刘家燕, 等. 机载光电吊舱无角位移隔振设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2799-2804.
WANG Ping, ZHANG Guo-yu, LIU Jia-yan, et al. Irrotational displacement vibration isolation on airborne optoelectronic pod[J]. Infrared and laser engineering, 2012, 41(10): 2799-2804.
- [2] KENNEDY P J, RHONDA L. Direct versus indirect line of sight (los) stabilization[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2003, 11: 3-15.
- [3] GJB 150. 16A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第16部分: 振动试验[S].
GJB150. 16A—2009, Military preparation laboratory environmental test methods Part 16: Vibration test[S].
- [4] 王平, 王伟, 丁金伟, 等. 机载光电侦察平台复合减振设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 83-89.
WANG ping, WANG Wei, DING Jin-wei, et al. Vibration damping design for airborne electro-optical surveillance platform[J]. Optics and precision engineering, 2011, 19(1): 83-89.
- [5] 赵鹏. 振动对航空相机成像质量影响的分析[J]. 激光与红外, 2001, 31(4): 240-242.
ZHAO Peng. Study on the influence of vibration on imaging quality for aerial cameras[J]. Laser and infrared, 2001, 31(4): 240-242.
- [6] 曾鹏, 杨春才, 张夏彬, 等. “机载激光试验台”现状及实战应用困境浅析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 050004_1-050004_5.
ZENG Peng, YANG Chun-cai, ZHANG Xia-bin, et al. Study on the status of ALTB and obstacles against its deployment[J]. Laser & optoelectronics progress, 2012, 49(4): 050004_1-050004_5.
- [7] 柯诗剑, 陈平, 李杰, 等. 线性振动、角扰动对机载光电吊舱图像质量的影响[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 198-202.
KE Shi-jian, CHEN Ping, LI Jie, et al. Influence of linear vibration and angular disturbance on image quality of airborne optoelectronic pod[J]. Journal of applied optics, 2013, 34(2): 198-202.
- [8] 梁爽. 无角位移减振装置机理研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
LIANG Shuang. Study on principle of irrotational displacement isolator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [9] 李玉龙, 何忠波, 白鸿柏, 等. 角振动对光学成像系统传递函数影响分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(15): 1784-1788.
LI Yu-long, HE Zhong-bo, BAI Hong-bai, et al. Analysis of influences of angular vibration on MTF in optical imaging systems[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(15): 1784-1788.
- [10] 刘家燕, 程志峰, 王平. 机载光电吊舱橡胶减振器的设计与应用[J]. 中国机械工程, 2015, 25(10): 1308-1311.
LIU Jia-yan, CHEN Zhi-feng, WANG Ping. Design and applications of rubber shock absorber in airborne photoelectric pod[J]. China mechanical engineering, 2015, 25(10): 1308-1311.
- [11] 李创, 郝小鹏, 孙颖, 等. 机载高精度光电吊舱无转角隔振设计[J]. 机电技术, 2014(4): 25-27.
LI Chuang, XI Xiao-peng, SUN Ying, et al. Design of airborne high-precision photoelectric pod without corner vibration isolation[J]. Electromechanical technology, 2014(4): 25-27.
- [12] 赵洪阳, 孟庆祯, 宋田, 等. 光电设备的三维减振系统设计[J]. 光电技术应用, 2011, 26(4): 1-7.
ZHAO Hong-yang, MENG Qing-wei, SONG Tian, et al. 3-DOF vibration reduction system design of optical equipment[J]. Electro-optic technology application, 2011, 26(4): 1-7.
- [13] 李玉龙, 何忠波, 白鸿柏, 等. 光电吊舱无角位移被动减振系统研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 88-97.
LI Yu-long, HE Zhong-bo, BAI Hong-bai, et al. Non-angular displacement passive vibration isolation system for optical pod[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(16): 88-97.
- [14] 刘树峰, 白鸿柏, 李冬伟, 等. 光电平台新型隔振机构设计[J]. 机械设计, 2012, 29(2): 16-19.
LIU Shu-feng, BAI Hong-bai, LI Dong-wei, et al. Design of a novel damping mechanism for the opto-electronic platform[J]. Journal of machine design, 2012, 29(2): 16-19.
- [15] 姜伟伟, 徐治洲, 任戈. 机载光电成像设备减振系统仿真及试验[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(3): 186-189.
JIANG Wei-wei, XU Zhi-zhou, REN Ge. Simulation and experiment validation of the vibration absorbing system of an airborne photoelectric imaging equipment[J]. Noise and vibration control, 2014, 34(3): 186-189.
- [16] 杨剑锋, 徐振邦, 吴清文, 等. 空间光学载荷六维隔振系统的设计[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1347-1357.
YANG Jian-feng, XU Zhen-bang, WU Qing-wen, et al. Design of six dimensional vibration isolation system for space optical payload[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(5): 1347-1357.
- [17] 杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. 机载光电平台隔振系统振动耦合分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(21): 2880-2884.
DU Yan-lu, DING Ya-lin, XU Yong-sen, et al. Analysis of coupled vibration in isolation system for airborne optoelectronic pod[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(21): 2880-2884.
- [18] 董海波, 武文华. 机载光电设备隔振装置设计开发与性能分析[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(1): 24-28.
DONG Hai-bo, WU Wen-hua. Design and performance Analysis of airborne photoelectric equipment vibration isolator[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012, 33(1): 24-28.
- [19] 曾垂峰, 闫峰. 光电平台内框架的六自由度振动控制研究[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(1): 28-32.
ZENG Chui-feng, YAN Feng. Six degree freedom dof vibration control for optoelectronic platform inner frame[J]. Optics & optoelectronic technology, 2015, 13(1): 28-32.
- [20] 孙辉, 王源超, 高九州, 等. 基于LOG的含柔性连接的机载光电载荷的振动控制[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8): 41-44.
SUN Hui, WANG Yuan-chao, GAO Jiu-zhou, et al. Vibration control of optical payload onboard with flexible parts based on LQG method[J]. Computer emulation, 2015, 32(8): 41-44.