

文章编号:1002-2082(2018)04-0453-07

# 一种机载光电设备减振系统设计及 稳定精度试验研究

郑凤翥<sup>1</sup>, 宁 飞<sup>1</sup>, 王培群<sup>2</sup>, 霍丽烨<sup>1</sup>, 赵志草<sup>1</sup>

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中航飞机股份有限公司 汉中飞机分公司, 陕西 汉中 723213)

**摘 要:**以光电设备减振系统为研究对象,从光电设备轻型化、小型化设计角度出发,针对现有内置橡胶减振系统的诸多不足,采用金属减振器,设计出一款适用于机载光电设备的外置型金属减振系统。通过对该减振系统的振动和冲击试验,测得固有频率、最大传递率及冲击最大位移值。通过对比光电设备在两种减振系统下的稳定精度,得出以下结论:外置金属减振系统和内置橡胶减振系统均能使光电设备的稳定精度满足不大于  $25\ \mu\text{rad}$  的使用要求,但外置金属减振系统能提高光电设备内部有效空间,同时,外置金属减振系统作为整体可更换单元,降低了减振系统的维修难度,提高了光电设备整体维修性,为其他光电传感器的集成和实现机载光电设备轻型化、小型化提供了可能。

**关键词:**内置减振系统;外置减振系统;光电设备;稳定精度

**中图分类号:**TN206;TH136

**文献标志码:**A

**DOI:**10.5768/JAO201839.0401002

## Design of vibration damping system for airborne optoelectronic equipment and research on stability accuracy test

Zheng Fengzhu<sup>1</sup>, Ning Fei<sup>1</sup>, Wang Peiqun<sup>2</sup>, Huo Liye<sup>1</sup>, Zhao Zhicao<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Hanzhong Aircraft Branch, AVIC Aircraft Co., Ltd., Hanzhong 723213, China)

**Abstract:** Starting from the light and miniaturization design angle of optoelectronic equipment, the optoelectronic equipment vibration system was taken as the research object. According to the shortcomings of the existing built-in rubber damping system, using metal damper, a suitable external metal damping system for airborne optoelectronic equipment was designed. Through the vibration and shock test of the vibration damping system, the natural frequency, the maximum transmission rate and the maximum impact displacement were measured. Finally, by comparing the stability accuracy of optoelectronic equipment in the two kinds of vibration system, it can be concluded that the external metal damping system and built-in rubber damping system can both make the stability accuracy of the optoelectronic equipment to meet the requirements for the use of less than  $25\ \mu\text{rad}$ . However, the external metal damping system can improve the internal effective space of the optoelectronic equipment, at the same time, the external metal damping system as a whole replaceable unit, it reduces the maintenance difficulty of the damping system, improves the overall maintainability of the optoelectronic equipment, which is possible for the integration of other optoelectronic sensors and the realization of light and miniaturization of airborne optoelectronic equipment.

**Key words:** built-in vibration damping system; external vibration damping system; optoelectronic equipment; stability accuracy

收稿日期:2018-01-12; 修回日期:2018-04-09

作者简介:郑凤翥(1988—),男,甘肃定西人,硕士研究生,主要从事光电总体技术研究工作。E-mail:zfp19881021@163.com

## 引言

光电设备作为飞机平台的重要任务设备,具备战场侦察、目标跟踪与指示等作战能力。减振系统是光电设备中唯一的减振与缓冲装置,用于减小载机平台振动和冲击对光电设备性能,特别是稳定精度的影响。目前,绝大部分减振系统被集成安装在光电设备内部,这种安装方式在占据光电设备内部有效空间的同时,增加了减振系统的维修保养难度。并且,近年来,随着军事发展的多样化需求,要求机载光电设备朝着轻型化、小型化和智能化方向发展,使得现有光电设备的减振系统已无法满足光电设备的发展需求。目前光电设备减振系统所采用的橡胶减振器,由于对称安装于光电设备内部、光电传感器与外框架之间,因此不可避免地存在以下缺点:1)占据光电设备内部狭小的有效空间,无法减小光电系统尺寸;2)增大了光电设备重量;3)橡胶减振器耐高温、低温性能差,使用寿命较短,减振性能下降较快;4)减振系统维修性差,更换或保养减振器时需要将内部光电传感器拆除。因此,将减振系统外置,设计减振性能好、环境适应性高、维修便捷的减振系统,是延长减振系统寿命和提高光电设备稳定精度的有效途径。

## 1 减振系统设计理论

### 1.1 减振系统力学模型

减振系统力学模型因工程实际、精确度及实际振动特性的不同而复杂多样,但单自由度系统作为研究一切减振系统的基础,其在一些复杂系统振动问题、多自由振动问题和弹性振动问题的研究中发挥了重要作用。质量-弹簧系统是单自由度系统的基本力学模型,该力学模型如图1所示。

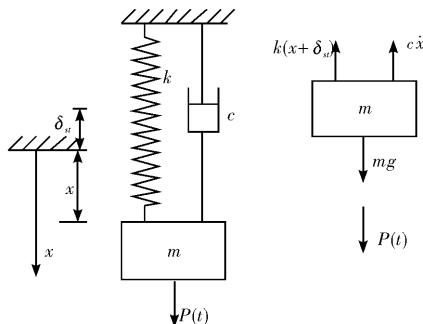


图1 单自由度系统的基本力学模型

Fig.1 Basic mechanical model of single degree of freedom system

如果被限制为只在垂直方向的运动,对于质量 $m$ ,其惯性力为 $m\ddot{x}$ ;对于弹簧 $k$ ,如果弹簧的变形在线弹性范围之内,其弹性恢复力为 $k\Delta x$ ,其中 $\Delta x$ 为弹簧的变形量;对于阻尼器 $c$ ,如果系统受线性粘滞阻尼作用,其阻尼力为 $c\dot{x}$ 。若取弹簧的静平衡位置为坐标的原点,设弹簧的静变形为 $\delta_s$ ,则弹簧恢复力为 $k(x+\delta_s)$ ,作用在系统上的激励为 $P(t)$ ,根据牛顿定律有:

$$m\ddot{x} = -k(x+\delta_s) - c\dot{x} + mg + P(t) \quad (1)$$

因为静平衡时有 $mg = k\delta_s$ ,带入上式得:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \quad (2)$$

式中: $k$ 为弹簧的刚度系数,单位为 $\text{N/m}$ ;  $c$ 为粘滞阻尼系数,单位为 $\text{N} \cdot \text{s/m}$ 。(2)式为单自由度系统线性振动的运动微分方程的一般形式。

### 1.2 振动系统的参数计算理论

根据振动来源,将振动的隔离分为两种:一种为主动隔振,一种为被动隔振。主动隔振是将振动的设备与周围环境隔开,以减少振源对周围环境的影响;被动隔振的振源来自外界环境,为了减小外界振动对设备或系统的影响而采取的隔振措施,称为被动隔振,光电设备与载机平台之间的隔振为被动隔振。被动隔振的效果用传递率表示,它定义为隔振后机器设备的振动幅值与外界振源的幅值之比,如果外界振源为简谐运动 $x_i = a \sin \omega t$ ,则其传递率 $T$ 为

$$T = \frac{B}{a} = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\lambda)^2}{(1 + \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (3)$$

式中: $B$ 为隔振后的振动幅值; $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ 为频率比;

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为固有频率; $k$ 为弹簧刚度; $\xi = \frac{c/m}{2\sqrt{k/m}}$

为系统的阻尼比。

传递率 $T$ 又称为振幅放大因子 $\beta$ ,为无量纲。以频率比 $\lambda$ 为横坐标,放大因子 $\beta$ 为纵坐标,做出不同阻尼比情况下的幅频响应曲线和相频响应曲线,如图2所示。

从图2的特性曲线可以得出传递率的一些特性,即

1) 只有当频率比 $\lambda > \sqrt{2}$ 时才有隔振效果;

2) 当 $\lambda = \sqrt{5}$ 以后,传递率下降很慢,曲线几乎水平,这时即使采用再好的隔振系统,其隔振效率的提高也不明显,因而工程中常选取 $2.5 < \lambda < 5$ ;

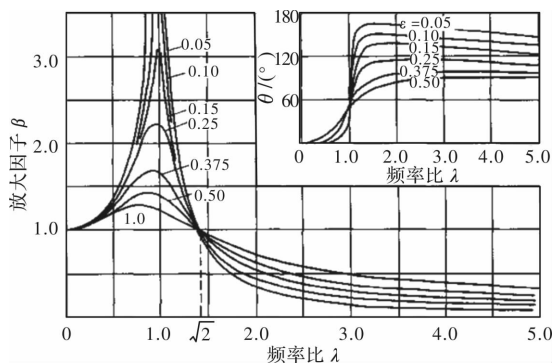


图2 不同阻尼比下的幅频响应曲线和相频响应曲线

Fig. 2 Amplitude frequency response curve and phase frequency response curve in different damping ratios

3) 当  $\lambda = \sqrt{2}$  以后,传递率相对阻尼比  $\xi$  的增大而提高,即增加阻尼反而降低了隔振效果。工程中要合理选择阻尼,充分权衡经济投入和隔振效果。

在设计减振系统时,一般先按照设计要求选定传递率  $T$ ,再确定频率比  $\lambda$  和相对阻尼比,最后计算减振系统弹簧的刚度  $k$ 。

## 2 减振系统设计

以两轴四框架光电设备减振系统为研究对象,结合光电设备现有内置橡胶减振系统的诸多缺点,应用减振隔振理论,对现有光电设备的减振系统进行全新设计。设计方案为:将减振系统从光电设备内部外移至光电设备与载机平台之间,选用刚度较大的金属减振器组合,能解决目前光电设备受自身橡胶减振器随温度变化抗振性能不断衰减的缺点。根据光电设备质量和载机振动谱特性,方案选用4个型号为GGZ-1-9H-T的金属减振器,将4个金属减振器对称安装于光电设备的重心两侧,使得该减振系统对光电设备的回转与平动两种振动互不影响,形成非耦合减振系统。对于垂向的振动和冲击,减振器在垂向均匀安装,在减小减振系统由于安装偏差造成的寿命损失的同时,保证了光电设备始终垂直于飞机航向;对于水平向的振动和冲击,由于减振系统的特殊安装形式,该系统在进行抗振和缓冲的同时,能及时纠正光电设备轴线的振动倾斜,具备轴线自校准能力。对于绕3个轴的回转运动,由于减振器对称安装,将形成一个与扰动角度大小成正比、方向相反的扭矩,具备对回转运动的自校正能力。

为了更好地说明新设计的外置金属减振系统的特点,图3和图4分别给出了现有内置橡胶减振系统的结构布局和外置金属减振系统的结构布局。

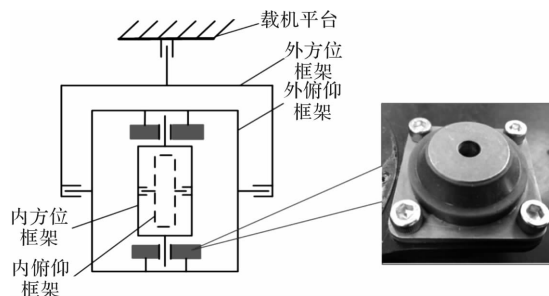


图3 内置橡胶减振系统结构布局

Fig. 3 Structure layout of built-in rubber damping system

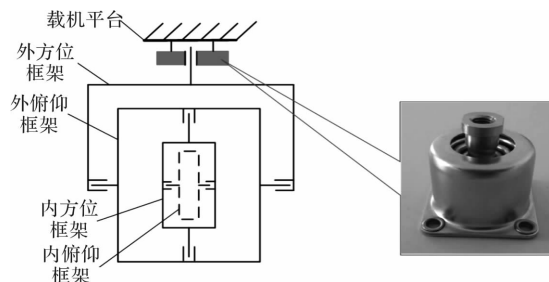


图4 外置金属减振系统结构布局

Fig. 4 Structure layout of external metal damping system

将光电设备减振系统从光电设备内部外移至光电设备与载机平台之间,减振系统的负荷增大,原有橡胶减振系统已无法满足光电设备对减振性能和稳定精度的要求,因而,新设计的外置减振系统采用刚度较大的金属器,将4个金属减振器围绕光电设备与载机平台的安装面均匀布置,实现对三向平动和转动的有效减振。另外,对比图3和图4可知,外置减振系统释放了其原先占有的光电设备内部有效空间,为其他光电传感器的集成及光电设备的轻型化、小型化提供了可能。另外,在减振系统维修性方面,外置减振系统设计作为整体可更换单元,在外场进行维护和更换时,无需拆除光电设备传感器,提高了光电设备的可维修性。因此,外置金属减振系统明显优于现有内置橡胶减振系统。

## 3 减振系统性能试验

为了验证外置金属减振系统的减振特性,对该减振系统的3个方向分别进行了0~200 Hz内的1 g扫频试验,X向和Y向15 g、11 ms半正弦波冲击试验,Z向20 g、11 ms半正弦波冲击试验,试验结果分别如图5和图6所示。这里,X向与飞

机横滚轴一致,Y向与飞机俯仰轴一致,Z向与飞机偏航轴一致,三者符合右手规则。

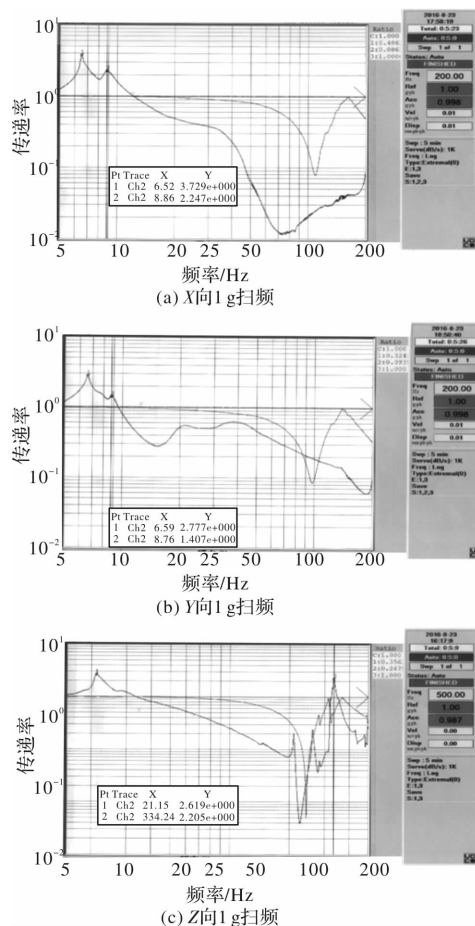


图 5 外置金属减振系统 3 向 1g 扫频试验

Fig. 5 Three-direction 1g sweep test of external metal damping system

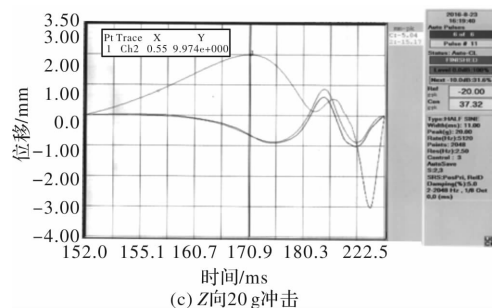
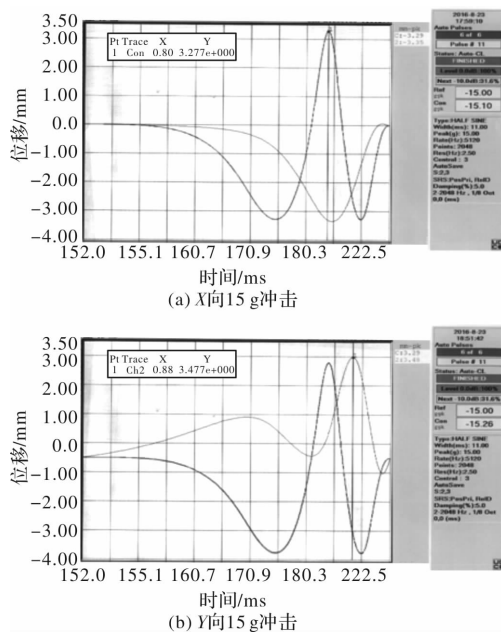


图 6 外置金属减振系统 3 向冲击试验

Fig. 6 Three-direction impact test of external metal damping system

结合图 5~图 6 试验结果,我们可以得出外置金属减振系统的 3 向固有频率及受冲击时的最大位移值,如表 1 所示。

表 1 外置金属减振系统参数测试值

Table 1 Parameter test value of external metal damping system

方向	固有频率/Hz	最大传递率	冲击最大位移值/mm
X	6.52/8.86	3.73/2.25	3.28
Y	6.59/8.76	2.78/1.41	3.48
Z	21.15	2.62	9.97

从表 1 可以看出:外置金属减振系统由于其在 X 向和 Y 向的严格对称性,其在低频时的 2 个固有频率近似相同,均在 6.5 Hz 和 8.8 Hz 附近,对应的最大传递率和受冲击时的最大位移值也相近,实测值和理论一致;Z 向由于减振系统的组合形式和安装位置的影响,其固有频率为 21.15 Hz,最大传递率为 2.62,受冲击时最大位移值为 9.97 mm。

外置金属减振系统 3 个方向共振点附近的曲线较陡峭,即减振系统的半功率带窄,说明该减振系统具有较小的阻尼,随着频率的增加,减振效果逐渐显现。从整个频谱曲线来看,该减振系统的低频减振差于高频,因此,对于高频振动来说,该减振系统的减振效果较为明显,减振系统参数满足光电设备的使用要求。

## 4 机载光电设备稳定精度对比试验

稳定精度是瞄准线稳定精度的简称,即稳定误差,指的是在载机扰动环境下,瞄准平台对瞄准线惯性稳定后的剩余稳态角度误差,通常按  $1\sigma$  均方根值定义。稳定精度的测量,是将光电设备置

于惯性模式下,在该模式下,光电设备内万向架由陀螺速率回路控制,用陀螺所测得的惯性速度作为回路的反馈。外万向架由位置回路控制,用解算器读数作为回路的反馈传感器,以此使外万向架跟随内万向架运动。用操控手柄作为陀螺回路的命令,当操控手柄输出为零时,系统处于稳定,绝对角速度为零。因而,在惯性模式下,操控手柄无输出时,将光电设备置于如图 7 所示的载机平台振动谱中,通过采集陀螺方位轴和俯仰轴的绝对角速度值,借助频谱分析仪便可得到对应的稳定精度。将外置金属减振系统安装于光电设备上,采用载机平台振动谱对光电设备在 X 向、Y 向和 Z 向的稳定精度进行测试,并和现有内置橡胶减振系统在同一振动谱下的 X 向、Y 向和 Z 向的稳定

精度进行对比分析。两种减振系统在载机振动谱下 3 个方向的稳定精度如表 2 所示。

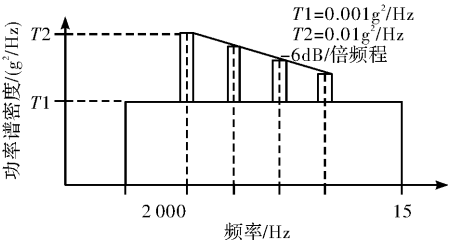


图 7 载机平台振动谱

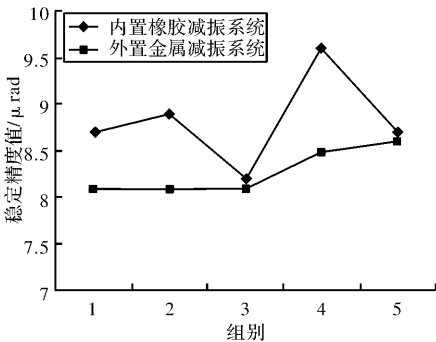
Fig. 7 Vibration spectrum of carrier platform

为了更直观地对光电设备在两种减振系统下的稳定精度进行对比分析,将两种减振系统在同一方向下的方位和俯仰稳定精度值用图表示,如图 8~图 10 所示。

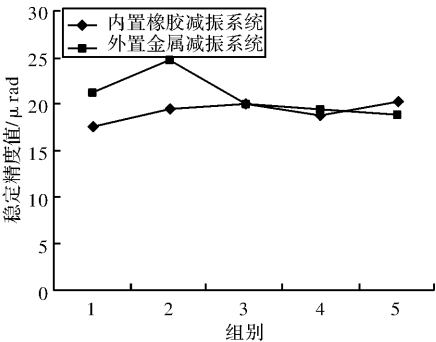
表 2 两种减振系统 3 个方向的稳定精度测试值

Table 2 Stability accuracy test value of two kinds of vibration damping system in three directions

减振系统	方向	测试项目	测试精度/ $\mu\text{rad}$				
内置橡胶减振系统	X	方位	8.7	8.9	8.2	9.6	8.7
		俯仰	17.5	19.5	20.1	19.0	20.3
	Y	方位	3.5	3.6	3.4	3.9	3.2
		俯仰	19.1	18.7	19.6	18.5	19.3
	Z	方位	4.6	4.5	4.6	4.3	4.2
		俯仰	9.7	9.9	10.1	9.1	9.2
外置金属减振系统	X	方位	8.1	8.1	8.1	8.5	8.6
		俯仰	21.2	24.7	19.9	19.4	18.8
	Y	方位	7.4	7.1	7.4	7.4	7.3
		俯仰	13.8	14.5	14.6	14.9	14.8
	Z	方位	4.5	4.8	4.9	4.7	5.2
		俯仰	11.8	11.9	11.6	11.2	11.2



(a) X向方位稳定精度



(b) X向俯仰稳定精度

图 8 两种减振系统在 X 向的稳定精度

Fig. 8 Stability accuracy of two damping system in X direction

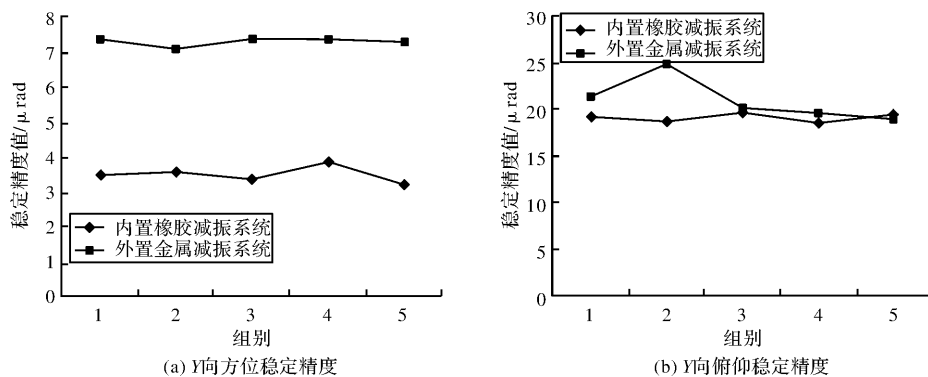


图9 两种减振系统在Y向的稳定精度

Fig. 9 Stability accuracy of two damping system in Y direction

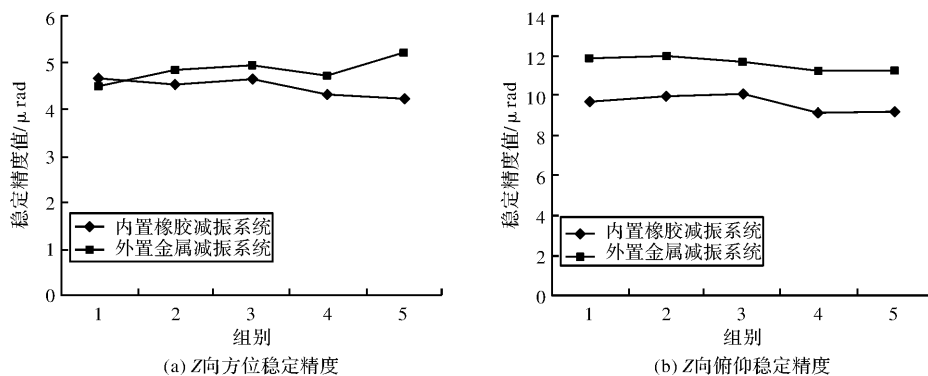


图10 两种减振系统在Z向的稳定精度

Fig. 10 Stability accuracy of two damping system in Z direction

通过对比图8~图10可知,光电设备在两种减振系统下的稳定精度值都小于 $25\mu\text{rad}$ ,满足光电设备对稳定精度的指标要求。因此,外置金属减振系统可释放光电设备内部有效空间,为其他光电传感器的集成和光电设备轻型化、小型化创造条件的情况下,能使光电设备达到和现有内置橡胶减振系统相当的稳定精度。

## 5 结论

通过实验结果可看出,将减振系统从光电设备内部外移至光电设备与载机平台之间的设计方案是可行的,这种外置金属减振系统设计增大了光电设备内部的有效空间,为光电设备轻型化、小型化创造了条件。同时,该减振系统的减振性能满足光电设备的使用要求,光电设备在该减振系统下的稳定精度与现有内置橡胶减振系统下的稳定精度相当。

## 参考文献:

[1] ZHANG Weiguo, TAO Zhong, MENG Lizhuang.

Resonant frequency calculation and test for damper of two axes four-gimbal EO pod [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 23-26.

张卫国,陶忠,孟立庄. 两轴四框架结构光电稳瞄吊舱减振器谐振频率计算与试验[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 23-26.

[2] HUANG Haiyuan. Mechanical vibration of electronic equipment and it's protection [J]. Journal of Yuyang Staff and Workers College, 2000, 4(1): 58-63. 黄海原. 电子设备机械振动及其防护[J]. 岳阳职工高等专科学校学报, 2000, 4(1): 58-63.

[3] MA Shuaiqi. Damping design of onboard electronic equipment[J]. Noise and Vibration Control, 2000, 4(1): 58-63.

马帅旗. 机载电子设备减振设计[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(2): 185-187.

[4] YANG Shaokang. Application research of vibration damping technology on the airborne photoelectric stabilized platform[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013.

杨少康. 机载光电稳定平台减振技术应用研究[D]. 西安:西安工业大学, 2013.

- [5] ZHAI Qingying, WANG Jianjun, QIU Jie. The application of metal damper to navy missile weapon system [J]. Tactical Missile Technology, 2006, 6(1): 27-31.  
翟庆鹰, 王建军, 邱杰. 金属减振器在海军导弹武器中的应用[J]. 战术导弹技术, 2006, 6(1): 27-31.
- [6] MA Lei. Performance study of resonance changer to overcome axial vibration of ship shafting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.  
马磊. 船舶轴系纵向减振器性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [7] WEI Wei. The research of optical axis stabilization of the airborne photoelectric platform [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, 2015.  
魏伟. 高精度机载光电平台视轴稳定技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [8] XU Rui. Study on the method of stabilization accuracy test on airborne platform [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.  
许瑞. 机载光端机稳定精度检测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [9] SHEN Shuai. Study on optical axis stability technology of airborne photoelectric platform under broadband vibration condition [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, 2016.  
申帅. 宽频振动条件下航空光电平台视轴稳定技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [10] WANG Jing, JI Ming, ZHANG Chong. Simulation on influence factor of line of sighting (LOS) stabilization precision [J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(6): 86-91.  
王晶, 纪明, 张冲, 等. 瞄准线稳定精度的影响因素仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(6): 86-91.