

## 机载光电系统外置被动隔振平台设计与分析

曹尹琦 宁飞 杜言鲁 王乐 赵志草 麦玉莹

### Design and analysis of external passive vibration isolation platform for airborne optoelectronic system

CAO Yinqi, NING Fei, DU Yanlu, WANG Le, ZHAO Zhicao, MAI Yuying

引用本文:

曹尹琦, 宁飞, 杜言鲁, 等. 机载光电系统外置被动隔振平台设计与分析[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1125–1131. DOI: 10.5768/JAO202445.0601003

CAO Yinqi, NING Fei, DU Yanlu, et al. Design and analysis of external passive vibration isolation platform for airborne optoelectronic system[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1125–1131. DOI: 10.5768/JAO202445.0601003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 一种光电载荷非线性隔振装置的研究

Research on nonlinear vibration isolation device for electro-optic payload

应用光学. 2021, 42(1): 16–22 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101003>

#### 菱形HSLDS隔振器负刚度机构质量及摩擦力影响分析

Analysis of mass and friction effect of negative stiffness mechanism of rhombic HSLDS vibration isolator

应用光学. 2021, 42(2): 207–214 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201001>

#### 机载光电稳瞄平台减振技术研究

Vibration reduction technology of airborne photoelectric stabilized sighting platform

应用光学. 2022, 43(4): 611–617 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401004>

#### 新型机载光电平台万向架及其关键技术

New-type gimbal mount of airborne optoelectronic platform and its key technologies

应用光学. 2022, 43(4): 577–582 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0409003>

#### 机载光电系统目标定位大气折射修正研究

Research on atmospheric refraction correction of airborne electro-optical system target location

应用光学. 2022, 43(4): 641–647 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401008>

#### 陀螺冗余安装在机载光电系统中的设计与应用

Design and application of gyro redundant installation in airborne electro-optical system

应用光学. 2022, 43(5): 833–838 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1125-07

# 机载光电系统外置被动隔振平台设计与分析

曹尹琦, 宁 飞, 杜言鲁, 王 乐, 赵志草, 麦玉莹

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 针对某无人直升机光电系统, 开展基于 Hexapod 构型的外置被动隔振平台设计与验证。建立 Hexapod 隔振平台动力学模型, 完成了隔振平台参数化建模, 并基于 Adams 和 Simulink 联合仿真进行数字样机仿真分析, 验证了模型的准确性; 对研制的工程样机进行了扫频测试和线/角耦合响应测试。测试结果表明: 隔振平台三方向线性激励固有频率均小于 8 Hz, 能够实现对直升机平台主振频点振动衰减, 且耦合角摆动响应均方根值 (root mean square, RMS) 值小于 200  $\mu\text{rad}$ 。最后完成了外场挂飞试验测试, 证明隔振平台工程样机满足使用要求。

**关键词:** Hexapod 隔振平台; 光电系统; 隔振模型; 动力学

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0601003

## Design and analysis of external passive vibration isolation platform for airborne optoelectronic system

CAO Yinqi, NING Fei, DU Yanlu, WANG Le, ZHAO Zhicao, MAI Yuying

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** For an unmanned helicopter optoelectronic system, the external passive vibration isolation platform was designed and verified based on the Hexapod configuration. The dynamic model of the Hexapod vibration isolation platform was established, the parametric modeling of the platform was completed, and the theoretical analysis and simulation comparison of the digital prototype were carried out based on Adams and Simulink co-simulation to verify the accuracy of the modeling. The sweep frequency test and the line/angle coupling response test of the developed prototype were conducted. The results show that the natural frequency of the three-direction linear excitation of the vibration isolation platform is less than 8 Hz, which can realize the vibration attenuation of the main vibration frequency of the helicopter platform, and the RMS value of coupling angle swing response is less than 200  $\mu\text{rad}$ . Finally, the field hanging flight test was completed, which verified that the engineering prototype of the vibration isolation platform met the operational requirements.

**Key words:** Hexapod vibration isolation platform; optoelectronic system; vibration isolation model; dynamics

## 引言

光电系统的主要任务是获取战场图像信息并反馈给指挥控制系统, 实现对目标的搜索、跟踪、定位及战场态势感知等功能<sup>[1]</sup>。直升机主旋翼转动会产生定频振动干扰, 为保证光电系统成像质量<sup>[2-3]</sup>, 外置被动隔振平台需要具备衰减直升机定频振动干扰的能力, 同时降低直升机线振动激励与光电

系统角摆动响应的耦合程度。

在机载光电系统外置被动隔振研究领域, 史文欣等<sup>[4]</sup>针对经典外置隔振形式进行理论分析与试验验证, 证明增大隔振器的布局跨距可以减小光电系统整体角摆动响应; 王平等<sup>[5]</sup>利用平行四边形原理设计了光电系统外置无角位移隔振装置, 能够将载机振动引起的角位移转化成线位移并有效

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2024-05-09

基金项目: XXXX 计划技术领域基金 (2021-XXXX-XX-0812)

作者简介: 曹尹琦 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事无人机载光电平台结构技术研究。E-mail: caoyinqi88@163.com

抑制线振动; DANIEL P<sup>[6]</sup>设计了一种由弹簧、铰杆、联轴器等组成的外置无角位移框架构件,有效限制了光电系统角位移;袁屹杰<sup>[7]</sup>基于高静刚度、低动刚度隔离技术,完成了一种采用菱形负刚度机构的外置隔振器分析与设计;方新文<sup>[8]</sup>从理论方面开展了光电系统外置三向等刚度 Stewart 隔振特性研究。

针对某直升机光电系统开展隔振平台研究。经典外置隔振形式受舱内空间约束,在重力方向上隔振刚度中心偏离光电系统质心,且隔振器布局跨距受限,导致其对水平方向的线振动激励/角摆动响应耦合抑制能力有限。无角位移隔振装置采用平行四边形机构,构型复杂,在现有空间较难完成结构布局。Hexapod 平台是基于空间并联机构 Stewart 平台<sup>[9]</sup>原理发展而成,其隔振理论成熟,构型较简单,布局灵活。基于 Hexapod 构型设计的隔振平台既能衰减直升机定频振动,同时又能够有效降低水平方向的线振动激励/角摆动响应耦合程度,符合项目使用要求。

本文基于 Hexapod 构型理论开展被动隔振平台研究<sup>[10-12]</sup>,建立动力学模型,通过理论分析与仿真对比完成隔振平台数字样机设计,且验证了隔振平台动力学建模的准确性。随后开展工程样机研制并完成性能测试,隔振平台满足低固有频率(<8 Hz)设计,能够衰减直升机 12.4 Hz 和 24.8 Hz 定频干扰,且具备线振动激励/角摆动耦合响应抑制能力,最后完成了外场挂飞试验验证。试验结果表明,基于 Hexapod 构型设计的隔振平台满足直升机载光电系统隔振要求,具备工程化应用能力。

## 1 隔振平台动力学建模

本文涉及的光电系统采用两轴两框架构型,通过 Hexapod 外置隔振平台将光电系统方位基座与直升机平台连接,如图 1 所示。光电系统使用前完成配重设计,配重后质心基本位于方位回转轴线上,在高低方向与方位基座存在偏心距。

Hexapod 型外置被动隔振平台属于并联机构,包含上平台和下平台,通过 6 根支杆传递力和运动。支杆分为上支杆和下支杆两部分,分别通过球铰与上下平台连接,上下支杆之间通过滑动副连接。平台运动部件数为 13,球铰副数为 12,滑动副数为 6,因此平台自由度  $F = 13 \times 6 - 12 \times 3 - 6 \times 5 = 12$ 。其中有 6 个自由度是支撑杆的自转,剩余的整

个平台自由度正好为 6。

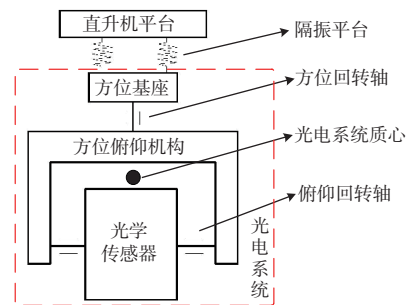


图 1 光电系统外置隔振示意图

Fig. 1 Schematic diagram of external vibration isolation for optoelectronic system

上平台与直升机载荷挂点连接,下平台与光电系统的方位基座连接,隔振模型简图如图 2 所示。在下平台与光电系统组成的系统(简称“隔振负载”)质心位置建立直角坐标系  $oxy$ 。  $x$ 、 $y$ 、 $z$  代表隔振负载沿 3 个坐标轴的线位移,  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$ 、 $\varphi_z$  分别代表隔振负载绕 3 个坐标轴的角位移。图 2 中 B 为上平台,与无人机连接;P 为下平台,与光电转塔连接;  $h$  为隔振负载质心到下平台的垂直距离( $z$  方向);  $H$  为上下平台之间的距离;  $R$  和  $r$  分别为上平台、下平台铰点分布圆半径;  $B1 \sim B6$  和  $P1 \sim P6$  分别为上平台、下平台对应的 6 处铰点,每个平台的 6 处铰点分 3 组,每组各 2 处,3 组铰点圆周均布;  $2\beta$ 、 $2\alpha$  分别为上平台、下平台每组铰点对应的圆心角。

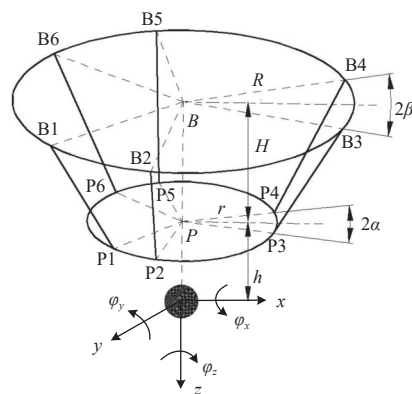


图 2 Hexapod 型隔振平台模型简图

Fig. 2 Model sketch of Hexapod vibration isolation platform

不考虑隔振器的质量,忽略隔振负载的惯性积,忽略激励、阻尼,并且所有位移均为小位移,则隔振负载自由振动时动力学微分方程<sup>[13-15]</sup>为

$$\begin{bmatrix} m & & & & & \\ & m & & & & \\ & & m & & & \\ & & & I_{xx} & & \\ & & & & I_{yy} & \\ & & & & & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\varphi}_x \\ \ddot{\varphi}_y \\ \ddot{\varphi}_z \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & & \\ & \sigma_2 & & & & \\ & & \sigma_3 & & & \\ & & & \sigma_4 & & \\ & & & & \sigma_5 & \\ & & & & & \sigma_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $m$  为隔振负载质量;  $I_{xx}$ 、 $I_{yy}$ 、 $I_{zz}$  为隔振负载惯性矩;  $k$  为支杆静刚度; 矩阵  $[\sigma]$  是根据雅克比矩阵求得的构型矩阵, 其中,

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 3 \left[ r^2 + R^2 - 2rR \cos(\beta - \alpha) \right] / L^2;$$

$$\sigma_3 = 6H^2 / L^2;$$

$$\sigma_4 = \sigma_5 = 3 \left[ (h+H)^2 r^2 + h^2 R^2 - 2rRh(h+H) \cos(\beta - \alpha) \right] / L^2;$$

$$\sigma_6 = 6r^2 R^2 \sin^2(\beta - \alpha) / L^2;$$

$$\sigma_7 = -\sigma_8 = 3 \left[ (h+H)r^2 + hR^2 - rR(2h+H) \cos(\beta - \alpha) \right] / L^2;$$

$$\text{支杆长度 } L = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos(\beta - \alpha) + H^2}.$$

由公式(1)可知,  $z$  轴线振动激励/角摆动响应是解耦的, 不受构型控制。假如要实现  $x/y$  轴上的线振动激励与  $y/x$  轴的角摆动响应解耦, 则刚度矩阵  $k[\sigma]$  必须为对角阵, 即  $\sigma_7 = \sigma_8 = 0$ 。如 Cubic 型 Stewart 平台采用特别构型<sup>[16-17]</sup>, 可保证相邻支杆在空间中相互垂直, 刚度矩阵为对角矩阵, 能够实现线振动激励/角摆动响应的完全解耦。

表 1 隔振平台设计参数

Table 1 Design parameters of vibration isolation platform

参数	$r/\text{m}$	$R/\text{m}$	$h/\text{m}$	$H/\text{m}$	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$
值	0.175	0.235	0.054	0.112	38	55
参数	$m/\text{kg}$	$\xi$	$k/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$I_x/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$I_y/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$I_z/\text{kg} \cdot \text{m}^2$
值	26.4	0.2	16 500	0.6	0.6	0.23

隔振负载中, 隔振下平台质量为 1.4 kg, 光电系统质量为 25 kg。受设计空间限制, 隔振平台构型并不能实现完全解耦。根据设计参数, 可得  $\sigma_7 = -\sigma_8 = -0.089$ ,  $x/y$  方向线振动激励/角摆动响应存在耦合。

参数化建模忽略了支杆阻尼运动部分的质量, 6 根支杆运动阻尼部分实际质量约为 0.9 kg。利用 Adams 完成精确建模, 建立支杆运动阻尼部

## 2 隔振平台设计与仿真

### 2.1 隔振平台数字样机设计

为满足空间要求, 隔振平台采取前两组/后一组空间布局形式。作为隔振平台重要组成, 支杆选用金属橡胶隔振器作为弹性阻尼元件, 支杆与隔振上下平台之间选用关节轴承作为支撑。隔振平台数字样机如图 3 所示。

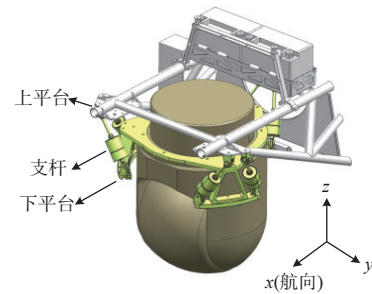


图 3 Hexapod 型隔振平台数字样机

Fig. 3 Digital model of Hexapod vibration isolation platform

隔振平台以光电系统质量特性为参考进行参数化设计。本文隔振负载(隔振下平台+光电系统)与隔振平台设计参数如表 1 所示。

分模型, 与参数化建模存在差异, 表现为: 隔振负载总质量  $m_1 = 27.3$  kg, 隔振负载质心偏移量  $h_1 = 0.051$  m, 惯性矩  $I_{x1} = 0.62$  kg·m<sup>2</sup>、 $I_{y1} = 0.62$  kg·m<sup>2</sup>、 $I_{z1} = 0.26$  kg·m<sup>2</sup>。

### 2.2 隔振平台模态求解

参考公式(1)和表 1, 利用 Matlab 可求得隔振平台 6 阶固有频率解析解; 利用 Adams 完成隔振平台精确建模, 仿真求解隔振平台各阶固有频率。最



终得到的模态阵型与固有频率如图 4 和表 2 所示。图 4(a)~4(f)分别对应第 7~第 12 阶模态阵型。

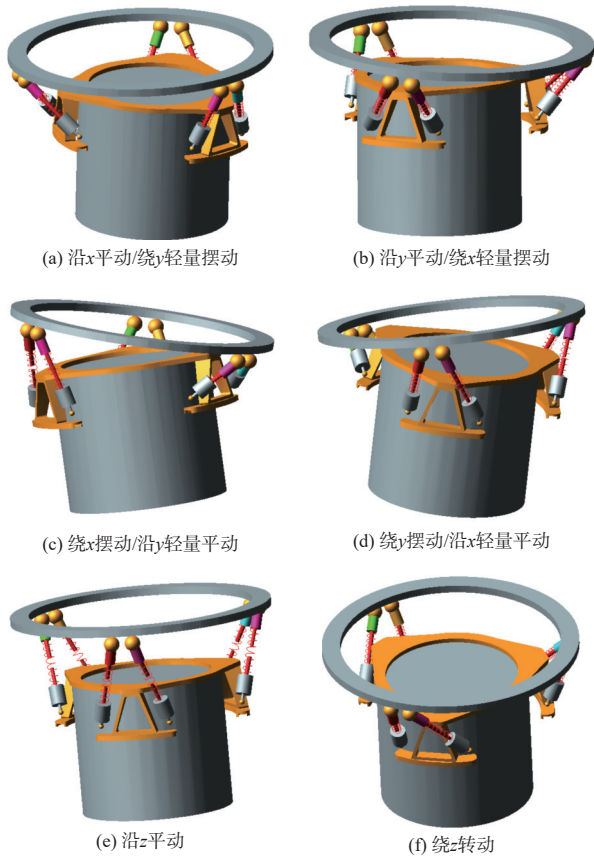


图 4 各阶模态阵型图

Fig. 4 Each order-modal formation diagram

表 2 隔振平台后 6 阶固有频率对比

Table 2 Comparison of last six-order natural frequencies of vibration isolation platform

	阶数					
	7	8	9	10	11	12
解析解/Hz	3.56	3.56	6.03	6.03	7.77	8.94
仿真值/Hz	3.54	3.54	5.88	5.88	7.40	8.33
相对误差/%	0.6	0.6	2.6	2.6	5	7.3

Adams 建模时,上下支杆与铰链之间采用球铰约束,上下支杆之间采用滑动副约束,求解共计 12 阶模态,前 6 阶模态为刚体模态,表现为支杆自转,后 6 阶模态为隔振负载 6 自由度运动模态。其中,7 阶和 8 阶模态为平动主模态,隔振负载存在轻量角摆动;9 阶和 10 阶模态为摆动主模态,隔振负载存在轻量平动;11 阶和 12 阶模态完全解耦,符合隔振模型参数化分析结论。基于仿真分析,验证了隔振平台并非完全解耦设计。

### 2.3 隔振平台线振动激励/角摆动响应耦合抑制能力仿真

隔振平台在  $x/y$  方向线振动激励/角摆动响应存在轻微耦合,为此基于 Adams 模型,在 Simulink 中完成联合仿真分析<sup>[18]</sup>,联合仿真模型如图 5 所示。在  $x/y$  方向按照直升机振动谱对隔振上平台(直升机载荷挂点)施加线性激励载荷,分析隔振下平台(选取光电系统质心) $y/x$  方向角摆动响应,联合仿真时光电系统采用刚体模型。

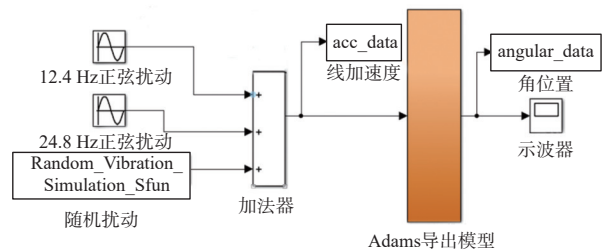
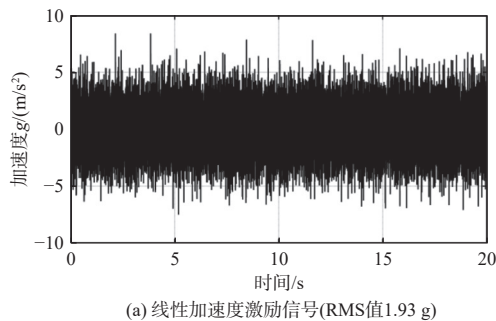


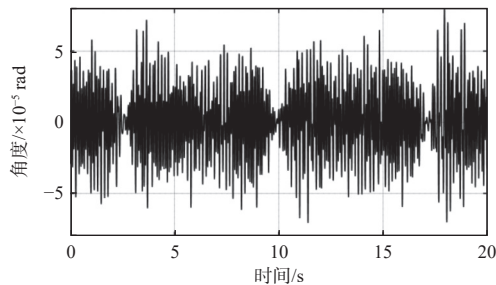
图 5 Adams 与 Simulink 联合仿真模型

Fig. 5 Adams and Simulink co-simulation model

图 6 对应  $x/y$  方向线性激励引起的  $y/x$  方向角位移响应仿真值,针对直升机振动谱,角摆动响应 RMS 值 $<25 \mu\text{rad}$ 。从仿真结果可以看出,隔振支架数字样机线激励/角响应耦合程度极低,参考光电系统光轴稳定性指标,隔振支架可近似认为属于解耦式设计,耦合抑制能力符合使用要求。



(a) 线性加速度激励信号(RMS值1.93 g)



(b) 角摆动响应信号(RMS值23.7  $\mu\text{rad}$ )

图 6 激励与响应曲线

Fig. 6 Excitation and response curves

3 试验测试

依托项目完成隔振平台和光电系统工程样机研制,表3为隔振平台实测值与仿真值的部分参数对比。隔振平台与光电系统刚性组合,形成光电隔振联合系统,基于振动试验台,对光电隔振联合系统开展性能测试,如图7所示。

表3 隔振平台参数对比

Table 3 Comparison of parameters for vibration isolation platform

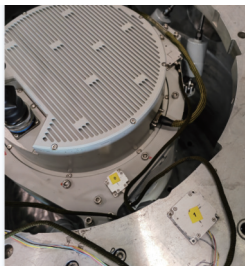
	$h/m$	$m/kg$	$\xi$	$k/N \cdot m^{-1}$
仿真值	0.051	27.3	0.2	16 500
实测值	0.058	26.8	0.15	16 000



(a) 工程样机



(b) 扫频测试

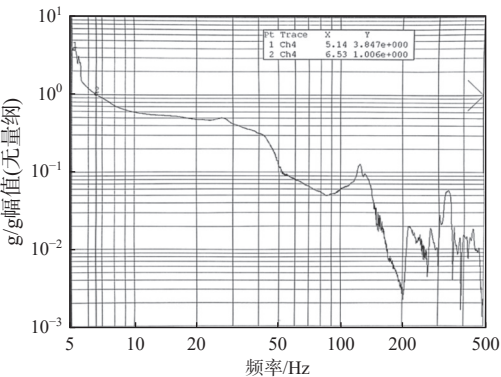


(c) 耦合响应测试

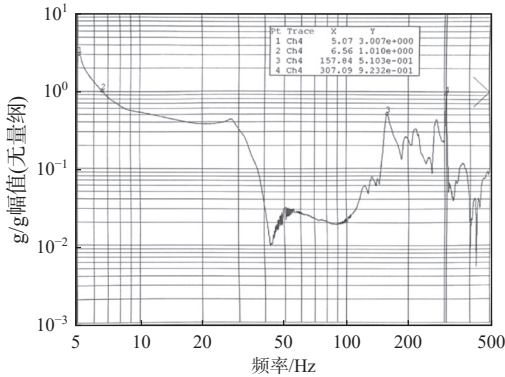
图7 工程样机与性能测试

Fig. 7 Engineering prototype and performance tests

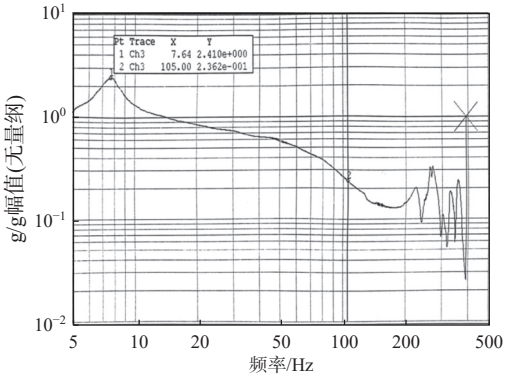
光电隔振联合系统3个方向5 Hz~500 Hz结构线性扫频结果曲线如图8所示。图8中一阶谐振点频率值即为隔振平台各方向固有频率。



(a) x方向5 Hz~500 Hz(0.3 g)扫频曲线



(b) y方向5~500 Hz(0.3g)扫频曲线



(c) z方向5 Hz~500 Hz(0.3 g)扫频曲线

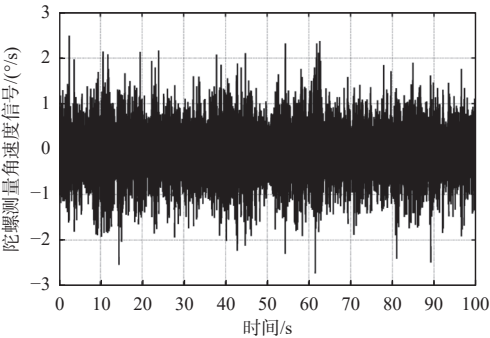
图8 系统扫频图

Fig. 8 System sweep frequency diagram

以隔振平台为测试对象,将信号采集陀螺固定于隔振平台下支架,测试振动台x向线性激励经过隔振支架后传递到光电系统外部的y向角摆动响应。测试结果如图9所示,图9中包含读取的陀螺角速率信息及积分后对应的角度信息。

根据试验过程,结合图8和图9进行对比分析。

1) x/y方向扫频试验中,隔振平台工程样机存在线性振动激励/角摆动响应耦合。5 Hz附近为共振区,振动台线性激励作用下隔振负载角摆动显著,对应绕x/y摆动主模态,过共振区后系统角摆动幅度衰减。隔振平台沿x/y平动主模态固有频率低于振动台启动频率,未能测出。z方向扫频试验



(a) 陀螺角速率信号(RMS值0.569 8 °/s)

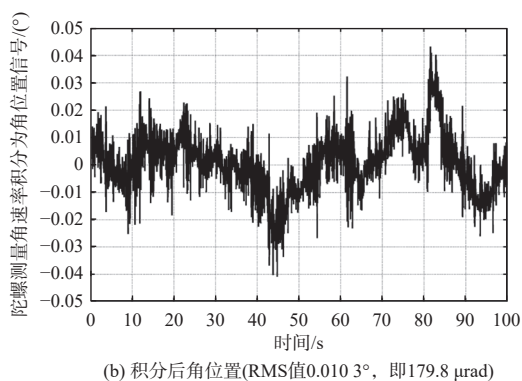


图9 耦合响应测试

Fig. 9 Coupling response test

中,过共振区(7.64 Hz附近)时,隔振负载只有上下平动,无明显角摆动。

2)  $x/y$  方向扫频试验中,在 12.4 Hz、24.8 Hz 频率处载机振动能量能够衰减到 60%,中低频段( $\leq 100$  Hz)隔振效果良好。 $z$  方向隔振平台的线振动激励/角摆动响应为解耦设计,同时受光电转塔构型和工作方式影响,载机  $z$  轴振动对光电图像稳定性影响较低。

3) 光电系统数字样机与工程样机在重量、质心、惯性距/惯性积等多方面存在误差,同时隔振平台支杆组件存在动/静刚度差异和刚度非线性,这些因素导致工程样机频率特性与数字样机仿真存在误差。

4) 隔振负载质心存在设计误差,且数字样机仿真时未考虑重力对隔振平台构型的影响,导致  $h$  和  $H$  的设计值与实际值存在误差。在  $x$  向线性振动测试时,发现振动工装基座在  $y$  向、 $z$  向两正交轴同时存在输出激励干扰,以上因素均导致隔振平台耦合程度实测数据(179.8 μrad)比仿真结果(23.7 μrad)大。

5) 对于隔振平台,隔振曲线在  $x$  方向和  $y$  方向理论上应该相似,而图 8 中  $x$  方向和  $y$  方向扫频曲线存在区别,原因在于扫频时加速度传感器粘贴于光电系统壳体表面,此时扫频对象是光电隔振联合系统(隔振平台+光电系统),扫频曲线包含隔振平台和光电系统两部分结构特性,但是光电系统机械结构在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  各方向的结构特性存在差异。同时,光电系统机械结构存在高频谐振,导致扫频曲线在高频处存在尖峰。实际运行过程中,载机高频振动分量较弱,高频振动对图像稳定影响较小。

外置被动隔振平台可衰减 12.4 Hz、24.8 Hz 定

频振动和中高频段随机振动,光电伺服控制系统能够对低频扰动进行抑制,通过两者相结合,光电系统稳定精度满足指标要求。外场装机挂飞试验如图 10 所示。后期隔振平台经过多次外场挂飞测试,飞行过程中隔振平台工作良好,无铰链锁死、支杆弯曲、结构干涉等现象,光电系统成像清晰稳定。试验结果表明,隔振平台满足使用要求,具备工程化应用能力。

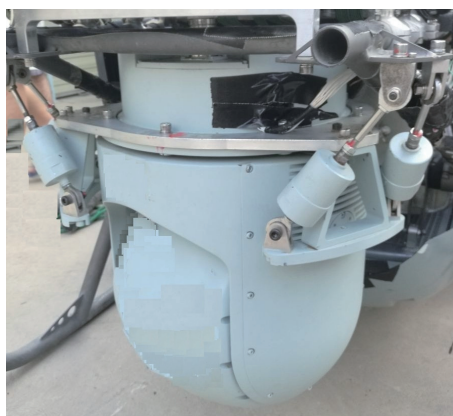


图10 外场装机挂飞试验

Fig. 10 Outfield installation flying test

## 4 结论

本文基于 Hexapod 隔振理论,完成隔振平台动力学建模,开展隔振平台理论解析值和联合仿真结果对比,基于数字样机完成工程样机研制与性能测试,最后完成外场挂飞测试。根据测试结果,得到以下结论:

1) 受实际设计空间约束,Hexapod 隔振平台在  $x$  方向和  $y$  方向较难实现解耦,只能通过构型优化降低耦合系数。本文所设计的隔振平台,通过理论计算和仿真分析对比,各阶固有频率结果较吻合。

2) 基于振动台测试,Hexapod 隔振平台能够实现 3 个方向均小于 8 Hz 固有频率,对载机  $x$  方向和  $y$  方向 12.4 Hz、24.8 Hz 定频振动和中低频段( $\leq 100$  Hz)随机振动能够有效衰减。

3) 受隔振负载重量、质心、惯量的设计误差和隔振平台阻尼、刚度的非线性影响,工程样机测试结果与数字样机仿真结果存在误差。其中隔振平台耦合抑制能力差异较大,后续将改善测试手段,针对质心偏移对耦合抑制能力的影响开展深入研究。

Hexapod 型外置被动隔振平台满足光电系统隔振要求,具备工程化应用能力,为机载光电系统被动隔振设计提供了一种新的解决方案。



## 参考文献:

- [1] 王惠林, 宁飞, 刘吉龙. 航空光电侦察技术发展研究[J]. *应用光学*, 2022, 43(5): 825-832.  
WANG Huilin, NING Fei, LIU Jilong. Development of aviation electro-optical reconnaissance technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 825-832.
- [2] 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*, 2003, 29(3): 281-283.  
ZHANG Bao, JIA Ping, HUANG Meng. Passive vibration control of image blur resulting from mechanical vibrations on moving vehicles[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(3): 281-283.
- [3] 赵鹏, 杨牧, 张葆. 航空机载光学设备的振动分析及座架减震器的设计[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(3): 58-63.  
ZHAO Peng, YANG Mu, ZHANG Bao. The vibration analysis and damper design of optic instrument in flying platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(3): 58-63.
- [4] 史文欣, 刘仲宇, 王平, 等. 航空光电吊舱隔振器布局方式分析[J]. *激光与红外*, 2018, 48(8): 1027-1030.  
SHI Wenxin, LIU Zhongyu, WANG Ping, et al. Analysis on vibration isolator layout of aerial optical-electronic pod[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(8): 1027-1030.
- [5] 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 Guoyu, LIU Jiayan, et al. Irrational displacement vibration isolation on airborne optoelectronic pod[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2799-2804.
- [6] DANIEL P. Gimbal system with a translational mount: WO2012170673A1 [P]. 2022-12-13.
- [7] 袁屹杰. 菱形负刚度机构高静低动刚度隔振器技术研究[D]. 北京: 中国兵器科学研究院, 2021.  
YUAN Yijie. Research on HSLDS isolator with rhombus negative stiffness mechanism[D]. Beijing: China Research and Development Academy of Machinery Equipment, 2021.
- [8] 方新文. 基于 Stewart 平台的光电吊舱隔振系统设计[J]. *噪声与振动控制*, 2022, 42(6): 279-284.  
FANG Xinwen. Design of optical pod vibration isolation system based on Stewart platform[J]. *Noise and Vibration Control*, 2022, 42(6): 279-284.
- [9] STEWART D. A platform with six degrees of freedom[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1965, 180(1): 371-386.
- [10] 盛慧, 董猛, 文立华. Hexapod 型隔振系统的建模与仿真[J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(13): 3314-3317.  
SHENG Hui, DONG Meng, WEN Lihua. Modeling and simulink of Hexapod vibration Isolation system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(13): 3314-3317.
- [11] 孙佳霖. 用于大型望远镜次镜调整机构的高精度 Hexapod 平台设计与研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.  
SUN Jialin. Design and research of high-precision Hexapod platform for secondary mirror adjustment mechanism of large telescope[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2021.
- [12] MCINROY J E, HAMANN J C. Design and control of flexure joint edhexapods[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(4): 372-381.
- [13] 朱石坚, 楼京俊, 何其伟, 等. 振动理论与隔振技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
ZHU Shijian, LOU Jingjun, HE Qiwei, et al. Vibration theory and vibration isolation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [14] 张鑫. 火箭隔振适配器参数特性分析与隔振性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
ZHANG Xin. Parameters analysis and research on isolation performance of whole-spacecraft vibration isolator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [15] 唐小斌. 被动式 Stewart 隔振平台的隔振性能仿真研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.  
TANG Xiaobin. Study on vibration isolation performance of Stewart platform for passive vibration isolation[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [16] MCINROY J E. Find symmetric orthogonal Gough-Stewart platforms[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(5): 880-889.
- [17] ALLAIS A A, MCINROY J E, O'BRIEN J F. Locally decoupled micromanipulation using an even number of parallel force actuators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(6): 1323-1334.
- [18] 杨晓强, 齐媛, 史雷蕾, 等. 基于 Matlab 和 ADAMS 的光电稳瞄系统结构控制联合仿真[J]. *应用光学*, 2016, 37(5): 657-662.  
YANG Xiaoqiang, QI Yuan, SHI Leilei, et al. Structure-control co-simulation of electro-optic stabilization system using Matlab and ADAMS[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 657-662.