

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.02.003

宽幅面阵摆扫相机结构优化设计

孙宝玉¹, 郭训薇^{1,2}, 张作良¹, 姜振海^{1,2}, 王超³

(1. 长春工业大学机电工程学院, 长春, 130012; 2. 南京华群光电技术有限公司, 南京, 210012;
3. 长光卫星技术有限公司, 长春, 130031)

摘要:为实现航拍相机的轻量化,设计一款安装在某无人机前腹安装板上的宽幅面阵摆扫相机并对其主框架进行优化设计。首先,根据无人机安装板的结构限制对摆扫机构进行总体设计;然后,应用 OptiStruct 软件对摆扫机构主框架的尺寸进行优化设计;之后,采用有限元分析法分别对摆扫机构主框架和摆扫机构整体进行模态分析、不同工况下的静力学分析和随机振动分析;最后,为摆扫机构做 Y 向的正弦扫频试验。优化后主框架的质量为 1.2 kg;摆扫机构固有频率避开了振源激振频率;摆扫机构最大应力为 62.35 MPa,最大变形为 1.03 mm;减振器共振频率处的频率值为 27 Hz。宽幅面阵摆扫相机基本满足相机轻量化的要求,摆扫机构固有频率、应力和变形均满足设计要求。

关键词:摆扫相机;主框架;有限元分析法;结构优化

中图分类号:TH17 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2020)02-0191-08

Optimal Design of Wide Area Array Sweeping Camera

SUN Baoyu¹, GUO Xunwei^{1,2}, ZHANG Zuoliang¹, JIANG Zhenhai^{1,2}, WANG Chao³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun, 130012, China;
2. Nanjing Huaqun Photoelectric Technology Co., Ltd., Nanjing, 210012, China;
3. Changguang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, 130031, China)

Abstract: In order to realize the lightening of aerial camera, a wide-area array sweep camera installed on the front web mounting board of an unmanned aerial vehicle (UAV) is designed and its main frame is optimized. Firstly, the overall design of the swing mechanism is carried out according to the structural limitation of the UAV mounting plate. Then, the size of the main frame of the swing mechanism is optimized by using OptiStruct software. After, the modal analysis, static analysis and random vibration analysis of the main frame and the whole swing mechanism of the swing mechanism under different working conditions are carried out respectively by using finite element analysis method. Finally, the sinusoidal sweep test in Y direction is carried out for the sweep mechanism. After optimization, the mass of the main frame is 1.2 kg, the natural frequency of the swing mechanism avoids the excitation frequency of the vibration source, the maximum stress and deformation of the swing mechanism are 62.35 MPa and 1.03 mm, respectively, and the frequency value at the resonance frequency of the shock absorber is 27 Hz. Wide area array swing camera basically meets

基金项目:无人机轻小型宽幅面阵智能航测系统关键技术研究(20180201106GX)资助项目;轻小型三线阵航摄仪关键技术研究(20170204078GX)资助项目。

收稿日期:2019-08-07; **修订日期:**2019-11-15

作者简介:孙宝玉,女,博士,教授,主要研究方向:机械CAD/CAE、精密机械微驱动、精密加工及检测。先后参加吉林省教育厅项目3项,参加吉林省科技厅项目3项,参加长春市科技局项目1项,参加国家自然科学基金项目3项。共发表学术论文30余篇,授权发明专利2项,实用新型专利1项。获得吉林省高校科技技术研究优秀成果一等奖、吉林省科技进步三等奖等。

通信作者:孙宝玉, E-mail: sunbaoyu@ccut.edu.cn。

引用格式:孙宝玉,郭训薇,张作良,等.宽幅面阵摆扫相机结构优化设计[J].南京航空航天大学学报,2020,52(2):191-198. SUN Baoyu, GUO Xunwei, ZHANG Zuoliang, et al. Optimal design of wide area array sweeping camera[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 191-198.

the requirements of lightening and miniaturization. The natural frequency, stress and deformation of the swing mechanism meet the design requirements.

Key words: sweeping camera; main support frame; finite element analysis; structural optimization

随着各行各业对地理空间信息需求的增长,世界各国都把地理信息看成是战略性的信息资源。航空遥感对地观测技术凭借其获取影像速度快、测量精度高等优势^[1-3],在短短的几十年里获得了迅猛发展,在人类获取地理空间信息中发挥着巨大作用,日益成为国家科学与经济发展中至关重要的技术手段。随着遥感信息产业的飞速发展,经济、科技和国防建设等各个领域对航空航天遥感信息服务的需求日益增加^[4-8]。孙建军为某全景式航空相机的设计了反射镜并完成了反射镜的结构设计、轻量化设计及柔性结构支撑结构设计^[9],但是其轻量化设计内切圆的尺寸公式只是经验公式且公式复杂;张楠等对相机的焦面组件、主框架及隔振系统进行了设计和优化,保证了遥感相机在提供八个谱段的同时具有良好的结构稳定性^[10],但是经过优化的主框架的质量较大;杨利伟等对小型红外相机进行了结构设计,对相机的模态、过载适应性和温度适应性进行了有限元分析^[11],但是该支撑结构复杂,加工难度较高;李富丽采用拓扑优化设计方法对空间多光谱相机的框架进行了优化设计,优化后的结构满足静力学面形精度要求,减轻了质量,提高了动态性能^[12],经过优化后虽然质量减少了38%,但是质量还是较大;汪奎等利用加强筋减重对相机反射镜进行轻量化设计,反射镜减重40.4%^[13],但是其镶嵌体和镜座之间采用胶接的方式会引起变形;Li等采用了一种基于随机响应均方根值的方法对空间相机主支撑结构优化设计,优化后支撑结构的尺寸过大^[14];徐孟迪等对某光学相机结构进行了优化设计并对优化后的结构进行了模态分析和热分析验证结果的准确性^[15],但是并没有对结构作不同工况下的力学特性分析;Wang等对相机的主框架进行了优化设计和仿真分析^[16],但是并没有用试验验证其结果的正确性。

本文研究了一种安装在某无人机前腹安装板上的宽幅面阵摆扫相机的摆扫机构。根据无人机的接口限制,设计摆扫机构的总体布局并对主框架进行轻量化设计,通过有限元仿真分析验证其结构满足设计要求,用Y向正弦扫频试验验证设计的合理性。

1 摆扫机构结构总体方案设计

摆扫机构安装在某无人机前机腹安装板上,安

装板4个角提供可安装的孔位。无人机机身方向和轴向的接口距离分别为246 mm和210.5 mm,安装板与机身蒙皮的竖直距离为50 mm。摆扫机构的结构尺寸限制:以无人机前机腹安装板孔位为基准,摆扫机构结构设计区域限制在安装板上的4个接口内且竖直方向向上小于200 mm,竖直方向向下小于 $\Phi 147$ mm。

摆扫机构由载体安装转接件、主框架、载荷安装转动组件、电路板封装、电机轴、编码器轴及轴承组成。摆扫机构通过均匀分布的4个减振器将载体安装转接件安装在无人机上;电路板封装与载体安装转接件通过螺栓连接;主框架与载体安装转接件通过螺栓连接;载荷安装转接件和主框架通过止口定位;电机和编码器分别安装在摆扫机构的左右两侧;编码器通过螺栓安装在主框架的右侧,并通过止顶螺栓与编码器轴连接。摆扫机构的总体布局如图1所示。

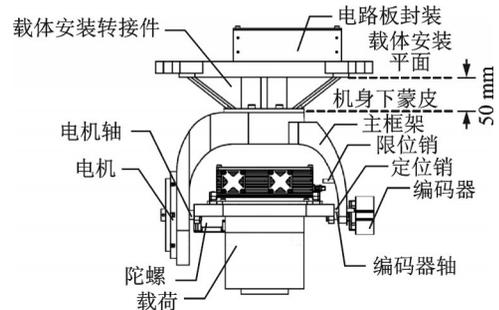


图1 摆扫机构结构总体布局图

Fig.1 Overall layout of swinging mechanism

2 摆扫机构的优化设计

本文以摆扫机构主框架的质量最轻为优化目标函数,以固有频率、应力、变形为边界条件,建立数学模型如下

$$\min(\text{MASS})$$

$$\text{s.t. } 60 \leq \text{ZJJH} \leq 85$$

$$5 \leq \text{ZKJLH} \leq 20$$

$$3 \leq \text{ZKJRH} \leq 15$$

$$200 \leq \text{ZKJW} \leq 250$$

$$36 \leq \text{ZKJTH} \leq 50$$

$$80 \leq \text{ZKJTD} \leq 90$$

$$\text{JWRJ} \leq \text{JZKJ}$$

$$\text{TS} \leq 390$$

$$\text{TD} \leq 1.5$$

其中:ZJJH为转接件厚度(mm);ZKJLH为主框架

左侧厚度(mm);ZKJRH为主框架右侧厚度(mm);ZKJW为主框架宽度(mm);ZKJTH为主框架上端厚度(mm);ZKJTD为主框架上端孔的直径(mm);JWRJ为无人机的激振频率(Hz);JZKJ为主框架的第一阶固有频率(Hz);TS为主框架在不同工况下的应力(MPa);TD为主框架在不同工况下的变形(mm)。

应用OptiStruct软件进行优化设计,得到最终尺寸优化结果并进行合理取值如表1所示。

表 1 设计变量与优化结果

变量	取值范围/mm	初始值/mm	优化结果/mm	设计结果/mm
ZJJH	[60,85]	80	68.2	68
ZKJLH	[5,20]	15	16.1	16
ZKJRH	[3,15]	10	5.8	6
ZKJW	[200,250]	240	215.8	216
ZKJTH	[36,50]	42	40.2	40
ZKJTD	[80,90]	85	82.3	82

本文设计的主框架选用的材料为铝合金(2A12),经过尺寸优化设计,主框架的质量为1.2 kg。

3 摆扫机构的力学特性分析

对摆扫机构进行有限元仿真分析,验证优化结果是否满足设计要求。

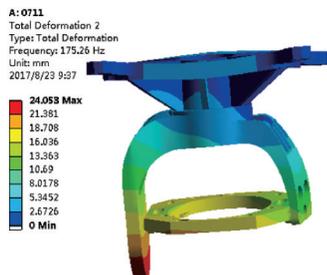
3.1 模态分析

3.1.1 摆扫机构主框架模态分析

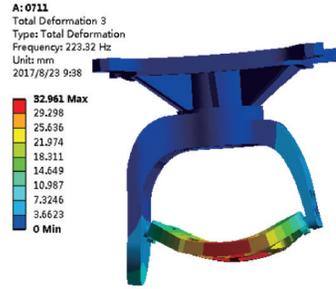
摆扫机构主框架前三阶模态分析结果如图2和表2所示。



(a) The first mode 168.85 Hz



(b) The second mode 175.26 Hz



(c) The third mode 223.32 Hz

图 2 摆扫机构主框架前三阶模态分析结果

Fig.2 The first three-order mode analysis results of main frame of swinging mechanism

表 2 摆扫机构主框架前三阶模态分析结果

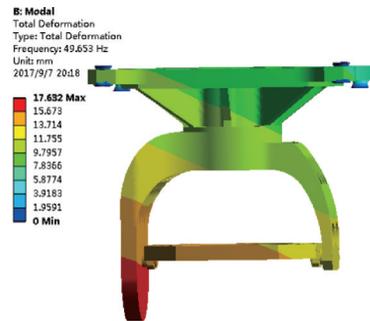
Table 2 Analysis results of the first three-order modes of main frame of swinging mechanism

模态阶数	1	2	3
频率/Hz	168.85	175.26	223.32
模态阵型	X转动	Y转动	Z平动

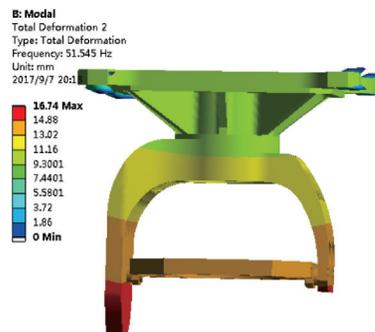
从图2和表2可知,摆扫机构主框架模态分析的前三阶模态阵型为X转动、Y转动、Z平动,频率分别为168.85,175.26和223.32 Hz。而无人机巡航阶段第一阶激振频率为92.5 Hz,第二阶激振频率为185 Hz,摆扫机构固有频率避开了振源激振频率,因此满足分系统指标的要求。

3.1.2 摆扫机构整体模态分析

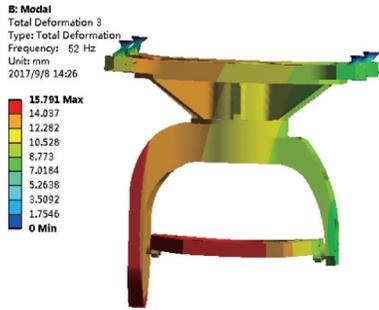
在有减振器的状态下,进行摆扫机构整体约束模态分析,前三阶模态分析结果如图3和表3所示。



(a) The first mode 49.6 Hz



(b) The second mode 51.5 Hz



(c) The third mode 52 Hz

图3 摆扫机构整体前三阶模态分析结果

Fig.3 Analysis results of the first three-order mode of whole swinging mechanism

表3 摆扫机构整体前三阶模态分析结果

Table 3 Analysis results of the first three-order mode of whole swinging mechanism

模态阶数	1	2	3
频率/Hz	49.6	51.5	52
模态阵型	Y 平动	X 平动	Z 平动

从图3和表3可知,摆扫机构整体模态分析的前三阶模态阵型为Y平动、X平动和Z平动,频率分别为49.6, 51.5和52 Hz。而无人机巡航阶段第一阶激振频率为92.5 Hz,摆扫机构固有频率避开了振源激振频率,且激振频率大于固有频率的 $\sqrt{2}$ 倍。

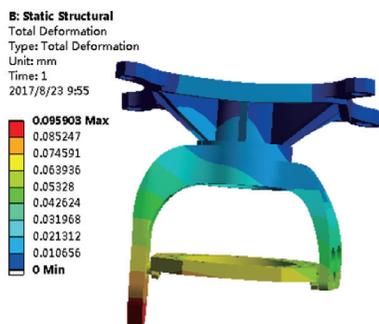
为了达到摆扫机构固有频率避开振源激振频率并且在激振频率处有良好隔振效果的目的,给出减振器的设计指标为:

- (1) 隔振系统固有频率小于50 Hz;
- (2) 共振频率处的放大倍数小于3;
- (3) 激振频率92.5 Hz处的隔振效率大于60%。

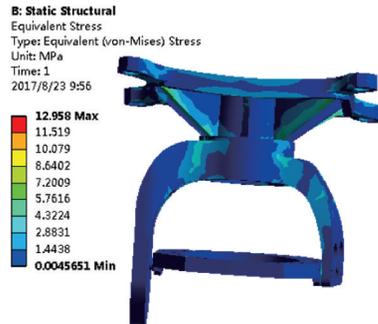
3.2 静力学分析

3.2.1 摆扫机构结构静力学分析

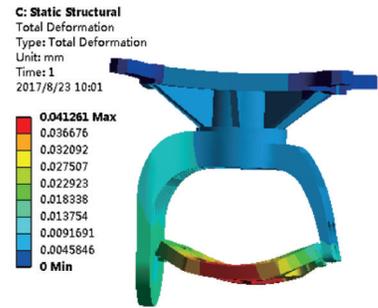
根据摆扫机构的实际工作环境条件,对摆扫机构主框架进行结构静力学分析,分别包括弹射极限工况8g的水平过载、应急伞降工况5g竖直过载、正常伞降和滑起滑降3g竖直过载,分析结果如图4和表4所示。



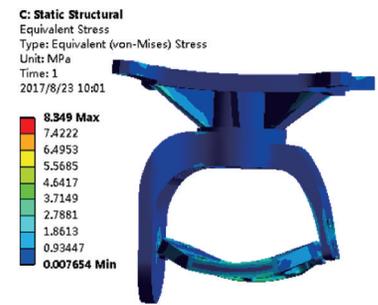
(a) 8g horizontal overload, maximum deformation 0.09 mm



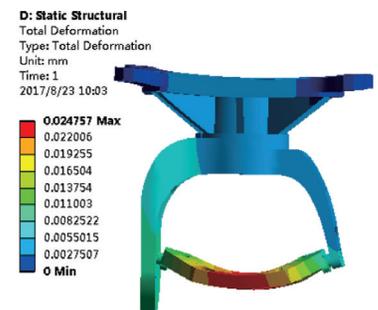
(b) 8g horizontal overload, maximum stress 12.9 MPa



(c) 5g vertical overload, maximum deformation 0.04 mm



(d) 5g vertical overload, maximum deformation 8.3 MPa



(e) 3g vertical overload, maximum deformation 0.02 mm



(f) 3g vertical overload, maximum deformation 5.01 MPa

图4 摆扫机构主框架静力学分析结果

Fig.4 Static analysis results of the main frame of swinging mechanism

表 4 摆扫机构主框架静力学分析结果

Table 4 Static analysis results of main frame of swinging mechanism

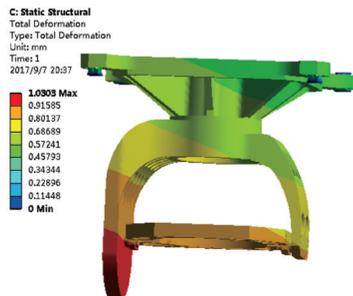
工况	过载值	最大 变形量/mm	最大 应力/MPa
弹射	水平 8g	0.09	12.90
应急伞降	竖直 5g	0.04	8.30
正常伞降滑起滑降	竖直 3g	0.02	5.01

从图 4 和表 4 可知, 水平 8g 过载时的变形最大, 其最大变形为 0.09 mm, 不会发生永久变形; 水平 8g 过载时产生的应力最大, 其最大应力发生在减振器和减振器安装板接处为 12.9 MPa, 小于铝合金(2A12)的抗拉强度 390 MPa。

3.2.2 摆扫机构整体静力学分析

在有减振器的状态下, 对摆扫机构整体进行静力学分析, 分别包括弹射极限工况 8g 的水平过载、应急伞降工况 5g 竖直过载、正常伞降和滑起滑降 3g 竖直过载, 分析结果如图 5 和表 5 所示。

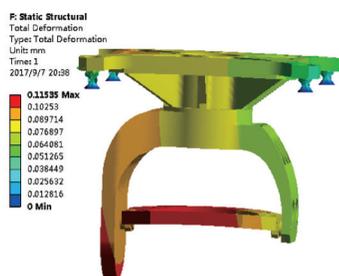
从图 5 和表 5 可知, 水平 8g 过载时的变形最大, 其最大变形为 1.03 mm, 不会发生永久变形; 水



(a) 8g horizontal overload, maximum deformation 1.03 mm



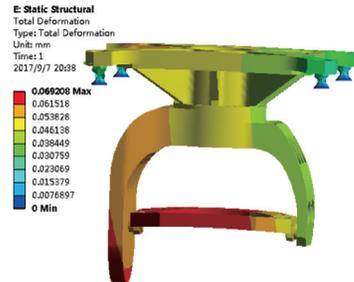
(b) 8g horizontal overload, maximum stress 17.69 MPa



(c) 5g vertical overload, maximum deformation 0.11 mm



(d) 5g vertical overload, maximum stress 12.90 MPa



(e) 3g vertical overload, maximum deformation 0.06 mm



(f) 3g vertical overload, maximum stress 7.74 MPa

图 5 摆扫机构整体静力学分析结果

Fig.5 Static analysis results of whole swinging mechanism

表 5 摆扫机构整体静力学分析结果

Table 5 Statics analysis results of the whole swinging mechanism

工况	过载值	最大 变形量/mm	最大 应力/MPa
弹射	水平 8g	1.03	17.69
应急伞降	竖直 5g	0.11	12.90
正常伞降 滑起滑降	竖直 3g	0.66	7.74

平 8g 过载时产生的应力最大, 其最大应力发生在减振器和减振器安装板接处为 17.69 MPa, 小于铝合金(2A12)的抗拉强度 390 MPa。

3.3 随机振动分析

3.3.1 摆扫机构主框架随机振动分析

根据某无人机的实际振动情况和《HB 5830.15—1996 机载设备环境条件及试验方法外观振动》标准对螺旋桨固定翼无人机的有关规定, 确定摆扫机构的振动条件和振动试验输入条件如图 6 和图 7 所示。

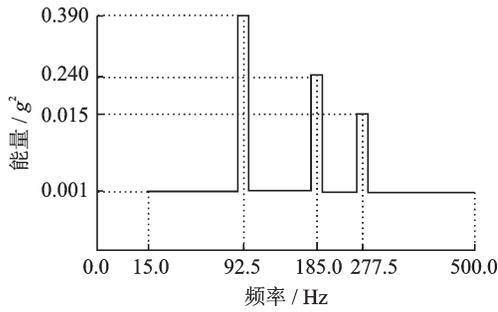


图6 竖直方向随机振动输入功率谱密度

Fig.6 Input power spectral density of vertical random vibration

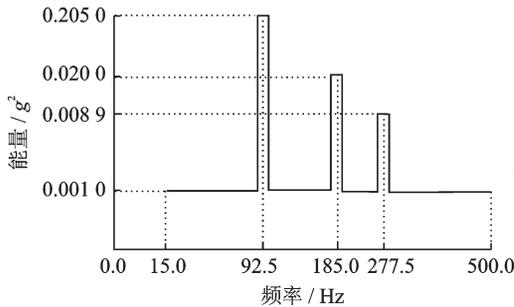


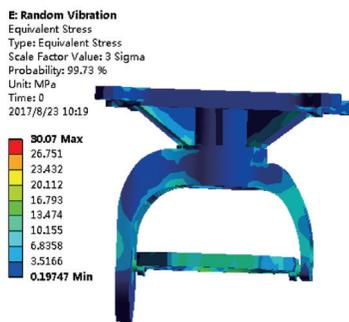
图7 水平方向随机振动输入功率谱密度

Fig.7 Input power spectral density of horizontal random vibration

根据上述随机振动输入功率谱密度,分别将振动方向设置为Z向和Y向。获得机载振动环境下的摆扫机构的变形结果和应力结果如图8所示。



(a) Maximum deformation 0.23 mm (3σ)



(b) Maximum stress 30.07 MPa (3σ)

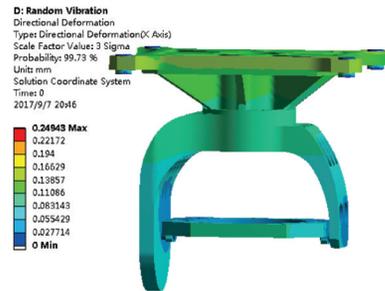
图8 摆扫机构主框架随机振动分析结果

Fig.8 Random vibration analysis of main frame of sweeping mechanism

从图8可知,摆扫机构的最大变形为0.23 mm (3σ),最大应力为30.07 MPa(3σ),满足总体指标对变形和应力的要求。

3.3.2 摆扫机构整体随机振动分析

在有减振器的状态下,根据上述随机振动输入功率谱密度,分别将振动方向设置为Z向和Y向。获得机载振动环境下的摆扫机构的变形结果和应力结果如图9所示。



(a) Maximum deformation 0.25 mm (3σ)



(b) Maximum stress 62.35 MPa (3σ)

图9 摆扫机构整体随机振动分析结果

Fig.9 Analysis results of global random vibration of swing mechanism

从图9可知,摆扫机构的最大变形为0.25 mm (3σ),最大应力为62.35 MPa(3σ),满足总体指标对变形和应力的要求。

4 试验测试

为验证摆扫机构在规定频率范围内的机械共振频率是否避开了振源的激振频率,为摆扫机构做正弦扫频试验。本次试验的设备为6.5 t振动台,试验温度为15~25℃,振动频率范围为15~300 Hz,振动频率高于25 Hz时,误差不超过±2%,等于或低于25 Hz时,误差不超过0.5 Hz,幅值为1g,扫频率为1 oct/min,加载方向为Y向。除了振动台振动量级控制加速度以外,还分别在振动夹具、相机安装转动组件、摆扫机构转接件上安装加速度传感器。摆扫机构振动试验如图10所示。加速度传感器获得的试验结果如图11所示。

减振器共振频率处的频率值为27 Hz,无人机巡航阶段第一阶激振频率为92.5 Hz,摆扫机

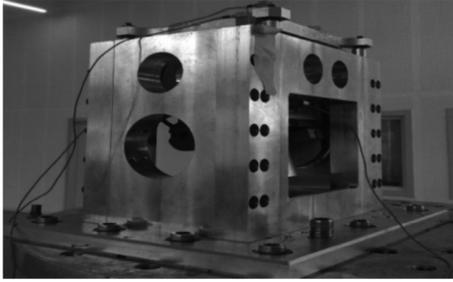


图 10 摆扫机构振动试验

Fig.10 Vibration test of swinging mechanism

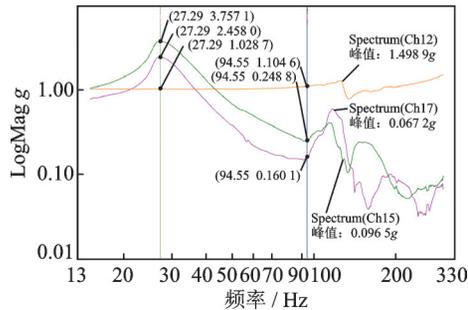


图 11 加速度传感器数据

Fig.11 Acceleration sensor data

构的固有频率避开了无人机的激振频率,摆扫机构不会发生共振,试验的结果验证了设计的合理性。

5 结 论

本文研制了一款安装在某无人机前腹安装板上的宽幅面阵摆扫相机并对摆扫机构的主框架进行了优化设计,优化后主框架质量为 1.2 kg。应用 ANSYS 软件对优化后的结构进行了模态分析、不同工况下静力学分析和随机振动分析。分析结果表明:摆扫机构固有频率避开了振源激振频率,最大应力为 62.35 MPa,最大变形为 1.03 mm。摆扫机构 Y 向正弦试验验证了设计的合理性。本文的研究成果对同类结构轻量化设计具有一定的参考和借鉴意义。

参考文献:

[1] 曾德林. 航空遥感惯性稳定平台框架控制系统研究[D].长沙:国防科学技术大学,2016.
ZENG Delin. Research on frame control system of aerial remote sensing inertial stabilization platform[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2016.

[2] COLOMINA I, MOLINA P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Re-

mote Sensing, 2014, 92: 79-97.

- [3] HELGE A, EIJA H, ARKO L, et al. Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 1091-1136.
- [4] 童庆禧. 空间遥感信息产业发展[J]. 卫星应用, 2012(1): 44-48.
TONG Qingxi. Development of spatial remote sensing information industry[J]. Satellite Applications, 2012(1): 44-48.
- [5] ADRIAN G R, OMAR V D, CHRISTIAN T, et al. Phenotyping conservation agriculture management effects on ground and aerial remote sensing assessments of maize hybrids performance in Zimbabwe[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 349-369.
- [6] RAHAGHI A I, LEMMIN U, SAGE D, et al. Achieving high-resolution thermal imagery in low-contrast lake surface waters by aerial remote sensing and image registration[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 773-783.
- [7] SHA Z Y. Comparison of leaf area index inversion for grassland vegetation through remotely sensed spectra by unmanned aerial vehicle and field-based spectroradiometer[J]. Journal of Plant Ecology, 2018, 12: 395-408.
- [8] WANG Xiaqing, ZHANG Ruyang, HAN Liang, et al. Dynamic plant height QTL revealed in maize through remote sensing phenotyping using a highthroughput unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Scientific Reports, 2019(9): 3458-3467.
- [9] 孙建军. 全景式航空相机扫描反射镜及支撑结构设计[J]. 现代机械, 2017(1): 41-44.
SUN Jianjun. Design of scanning mirror and supporting structure for panoramic aerial camera[J]. Modern Machinery, 2017(1): 41-44.
- [10] 张楠, 常君磊, 李庆林, 等. 双通道离轴遥感相机高稳定性光机结构设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 207-215.
ZHANG Nan, CHANG Junlei, LI Qinglin, et al. Structural design of high stability optical machine for dual-channel off-axis remote sensing camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 207-215.
- [11] 杨利伟, 李志来, 辛宏伟, 等. 小型红外相机结构设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3025-3031.

- YANG Liwei, LI Zhilai, XIN Hongwei, et al. Design and analysis of small infrared camera junction[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3025-3031.
- [12] 李丽富. 空间相机结构设计与优化[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- LI Lifu. Structural design and optimization of space camera[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [13] 汪奎, 辛宏伟, 徐宏, 等. 空间相机快速反射镜的结构轻量化设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 177-183.
- WANG Kui, XIN Hongwei, XU Hong, et al. Light-weight design of space camera fast reflector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 177-183.
- [14] LI L, TAN L, WANG D, et al. Optimal design of the main support structure of space camera aiming at the RMS value of random response[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(4): 2331-2340.
- [15] 徐迪孟, 王平, 付海双, 等. 双视场航空相机光机优化设计[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 853-857.
- XU Dimeng, WANG Ping, FU Haishuang, et al. Optical design of dual field of view aerial camera[J]. Laser and Infrared, 2017, 47(7): 853-857.
- [16] WANG Q L, WANG W Z, JIANG H J, et al. Structural design and simulation analysis of the carbon fiber-reinforced polymer main frame of a mapping camera system[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 474: 012031.

(编辑: 孙静)