

# 超小型无人机光电稳定平台照准架的结构优化设计

刘仲宇<sup>1,2</sup> 张涛<sup>1</sup> 李嘉全<sup>1</sup> 李明<sup>1</sup> 王帅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春, 130033;

2. 中国科学院大学, 北京, 100039)

**摘要:**超小型稳定平台照准架是保证平台指标精度实现的关键结构件。为了减小稳定平台照准架的质量和体积, 对其结构形式和受力情况进行了研究, 采用 NX/Nastran 软件对照准架结构进行了仿真分析, 依据结果对照准架结构进行了优化设计。优化结果使照准架的质量减小到 88 g, 占其质量的 30%, 有利于稳定平台轻量化设计。对优化后的照准架进行了模态分析和热分析。模态分析显示, 照准架主体一阶频率为 415 Hz; 热分析显示, 照准架在 120 °C 温差作用下变形大小为 0.083 mm, 满足飞机总体性能指标的要求。最后通过对稳定精度和测角精度的检测以及振动和高低温试验及外场飞行试验, 验证了仿真分析的正确性, 表明对照准架的优化设计是成功的。

**关键词:**超小型无人机; 照准架; 结构优化; 稳定平台

中图分类号: TH703

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2013)01-0104-06

## Optimal Design of Aiming Frame Structure of Photoelectric Stabilized Platform for Small UAVs

Liu Zhongyu<sup>1,2</sup>, Zhang Tao<sup>1</sup>, Li Jiaquan<sup>1</sup>, Li Ming<sup>1</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China)

**Abstract:** The aiming frame of photoelectric stabilized platform for small unmanned aerial vehicles(UAVs) is the key component that ensures accuracy index of platform. In order to reduce the mass and the size of the component, the aiming frame structure and the case of their force are studied with NX/Nastran. Then, the optimization design of the aiming frame structure is achieved according to the analysis results. The results show that the mass of the aiming frame is reduced by 88 g, which is 30% of the primary weight, and that is beneficial to lightweight design of the platform. The modal analysis and thermal analysis are carried out on the optimized aiming frame. It indicates that the aiming frame's first-order natural frequency is 415 Hz by modal analysis and the thermal deformation of the aiming frame is 0.083 mm in the temperature difference of 120 °C by thermal analysis. The analysis results meet overall performance indexes of aircraft. Finally, through the stabilized accuracy and angle measurement accuracy test, vibration test, high and low temperature tests and flight test, the correctness of the simulation analysis are proved, which indicates that the optimized design of the aiming frame is successful.

**Key words:** small unmanned aerial vehicles(UAVs); aiming frame; structure optimization; stabilized platform

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2008AA121803)资助项目;国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2009CB72400607)资助项目。

**收稿日期:**2012-02-13;**修订日期:**2012-04-10

**通信作者:**张涛,男,教授,博士生导师,1964年出生,E-mail:Zhangt@ciomp.ac.cn。

近年来,超小型(机翼直径在 1~2 m)无人机因为体积小,隐蔽性好,机动灵活、成本低等优点,引起了诸多科研单位的重视。它被广泛应用在军事和民用领域。在军事领域,它适合侦察部队援助巡逻、监视周边、前向观察、搜索和救援行动<sup>[1]</sup>。在民用领域,它主要用于地质灾害评估,农作物和环境监测以及地图测绘<sup>[2-5]</sup>。然而超小型无人机因有负载能力较小的缺点,使其机载的飞控系统、数据链系统和光电稳定平台的体积和质量都受到限制<sup>[6]</sup>。至今,已有许多公司致力于机载设备小型化的设计与研发<sup>[1]</sup>。

超小型无人机光电稳定平台是一款两轴的光电传感器转台<sup>[7]</sup>。它搭载不同的传感器载荷,获得重要的信息情报,是提高无人机性能指标的有效手段<sup>[8-9]</sup>。目前,随着无人机小型化的发展,对稳定平台的设计提出了很高的要求。对稳定平台结构进行仿真分析和轻量化设计显得十分必要<sup>[10]</sup>。为了减轻整机质量,无人机机头和光电稳定平台进行了一体化设计——将光电稳定平台直接作为无人机机头。这种安装方式对平台的力学性能带来新的考验。

照准架是光电稳定平台的关键件之一,它作为平台的主体框架,承载着整个平台的重量,它的力学性能直接关系到平台的固有特性,它也是导致横滚轴系和俯仰轴系误差的主要根源。在多数的无人机稳定平台中,照准架常常是被吊装使用,一般只存在垂直方向的误差位移量,而对于超小型无人机稳定平台照准架,因为被横挂在机头,其悬臂结构,会带来平台的转角误差,因而对照准架的刚度提出更高要求。照准架作为整个平台的主体,它占有平台最大的质量份额。因此,在保证其刚度的情况下,必须对其结构进行优化。

## 1 主要技术指标

根据实际应用的要求,超小型无人机光电稳定平台的主要设计指标如下

- (1)测角精度: $\leq 15 \text{ mrad}$ 。
- (2)稳定精度: $\leq 2 \text{ mrad}$ 。
- (3)整体尺寸要求: $\leq \varnothing 120 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。
- (4)质量: $\leq 1 \text{ kg}$ 。
- (5)运动角度:横滚  $-45^\circ \sim 0^\circ \sim +45^\circ$ ;俯仰  $-10^\circ \sim 0^\circ \sim +80^\circ$ (垂直向下为  $0^\circ$ )。

光电稳定平台的组成如图 1 所示。主要包括照准架、俯仰和横滚两个轴系以及装载在俯仰轴系

的内框架上的可见光电视摄像机或前视红外仪等任务载荷。两个轴系通过角度传感器、角速率陀螺以及驱动电机完成对任务载荷的稳定和目标定位跟踪。

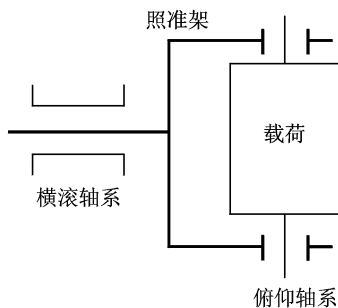


图 1 光电稳定平台组成示意图

## 2 照准架的结构优化设计

照准架既是横滚轴系的旋转体,又是俯仰轴系的支架,可见它是影响光电稳定平台技术指标的最主要的部分。在对照准架进行设计时,主要保证横滚轴与俯仰轴轴线的垂直度以及电机轴与编码器轴的同轴度的要求。

### 2.1 照准架的设计

照准架的设计要符合实际加工的要求。在一些大型光电稳定平台照准架设计时,为了考虑加工工艺,常把照准架分成一个独立的轴和另一个正交的轴系支架两个零件,再把它们通过螺钉安装在一起。这样的设计会带来两个零件的安装误差,从而影响两个轴系的精度。超小型稳定平台照准架,因体积小,采用了一体化的设计方案。其初步设计结构如图 2 所示。根据照准架的使用状态,图 2 位置即照准架运动角度为  $0^\circ$  时受力最大,对其进行受力分析,照准架可以简化成悬臂梁结构,其受力图如图 3 所示,计算公式为

$$F_1 \times L_1 = G_2 \times (L_2 + L_3) + G_1 \times L_2 \quad (1)$$

$$F_2 \times L_1 = G_2 \times (L_1 + L_2 + L_3) + G_1 \times (L_1 + L_2) \quad (2)$$

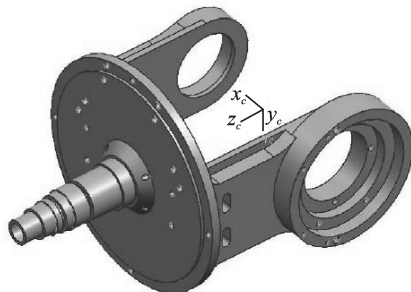


图 2 照准架结构设计图

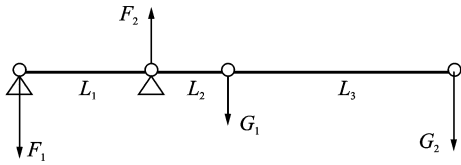


图3 照准架受力分析图

式中： $F_1$  为前端轴承接触面对照准架的作用力； $F_2$  为后端轴承接触面对照准架的作用力； $G_1$  为照准架的自重； $G_2$  为俯仰轴系部件对照准架的作用力； $L_1, L_2, L_3$  为作用力点间的距离。

根据初步设计的结果， $G_1 = 1.26 \text{ N}$ ， $G_2 = 7 \text{ N}$ ， $L_1 = 21.5 \text{ mm}$ ， $L_2 = 26 \text{ mm}$ ， $L_3 = 31 \text{ mm}$ 。可解得  $F_1 = 20 \text{ N}$ ， $F_2 = 28 \text{ N}$ 。

## 2.2 照准架的仿真分析

照准架的仿真分析力求解决两个问题：(1) 找出照准架的受力薄弱点，对其进行加强以使得搭载其上的光电载荷偏移量最小。(2) 加强照准架的比刚度，使得稳定平台具有更大的谐振频率，以适应速度回路带宽要求，确保光电稳定平台动态响应与控制系统的跟踪和定位能力满足要求<sup>[11]</sup>。

### 2.2.1 照准架的有限元模型

照准架有限元模型采用 3D 图形软件 NX4.0 建立，然后，利用其高级仿真模块 Nastran 对模型前后处理，进行网格划分并计算分析输出结果。对照准架有限元模型进行网络划分时，由于其结构设计比较对称，无明显过薄的特征结构，因此，采用 3D 十节点四面体网格<sup>[12]</sup>，而网格划分应尽量使单元大小均匀，从而提高分析结果的可靠性和减少分析所占用的时间<sup>[13]</sup>。照准架的网格通过 UG 自带的网格生成器进行划分，共划分成 17 051 个单元，32 807 个节点。照准架的有限元模型如图 4 所示。在进行有限元分析前，首先要给模型添加材料属性。照准架的材料选用是一个需要综合考虑的问题，主要原则是要求材料的比刚度和比强度高，且具有良好的环境稳定性，加工性和经济性等。表 1

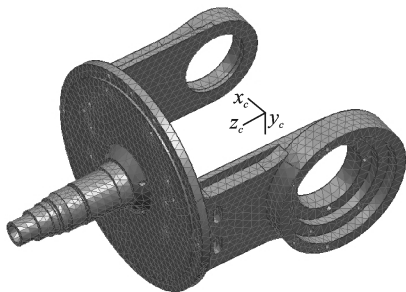


图4 照准架的有限元模型

为机载设备结构件常用材料性能参数。可见，碳纤维的性能参数最好，但是考虑到它的加工性差，而且成本太高，一般选择性能次之的超硬质铝合金，它具有良好的比刚度和可加工性能，这更有利于稳定平台的小型化。

表1 机载设备常用材料性能参数

材料名称	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	比刚度 $(E/\rho)/(\text{GPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	比强度 $(\sigma_b/\rho)/(\text{MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$
45号钢	7.8	205.8	1 009	26.4	129.4
铝合金	2.8	73.5	460	26.3	164.0
钛合金	4.5	111.7	941	24.8	209.0
玻璃钢	2.0	39.2	1 039	19.6	520.0
ABS	1.2	2.4	40	2.0	33.0
碳纤维	1.6	235.2	1049	147.0	656.0

### 2.2.2 照准架的结构优化设计

照准架的受力情况已经在前文加以分析。图 5 为照准架受力分析仿真图，从图中可知，照准架的最大变型量为 0.009 mm。变型量很小，满足轴系精度的要求，可见照准架的设计合理。为了进一步减轻稳定平台的质量，在不改变变型量数量级的情况下，对初步设计的照准架进行倒圆角，采用工字梁和加强筋结构（以获得优越的力学性能和经济截面的特性）和减薄强度过高部分的结构从而进行优化。

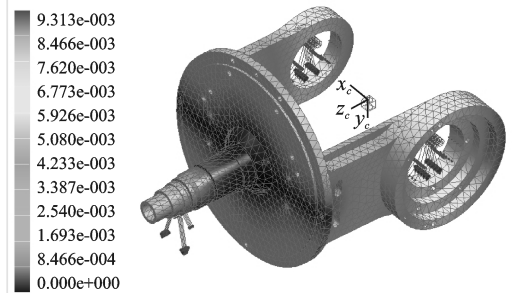


图5 照准架受力分析仿真图

在优化设计中，反复通过 NX/Nastran 软件进行仿真分析。把照准架的质量最小化设为目标函数，照准架变型量位移上限值 0.01 mm 为约束条件，减重孔的深度设为优化变量，最终的设计结果如图 6 所示。经优化，在照准架总体接口尺寸和厚度不变的情况下，去除了承受力效率低的结构，两肋板局部厚度从 7 mm 优化到 1.5 mm，整体质量从 126 g 减少到 88 g。质量减少 30%，有利于超小型稳定平台的轻量化要求。

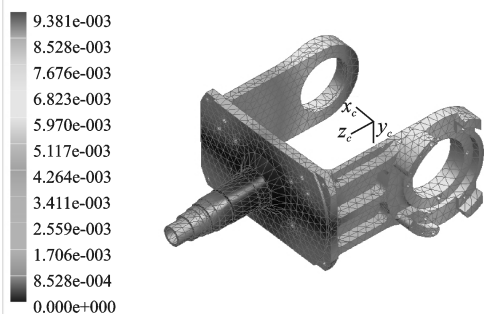


图 6 设计优化后的受力分析仿真图

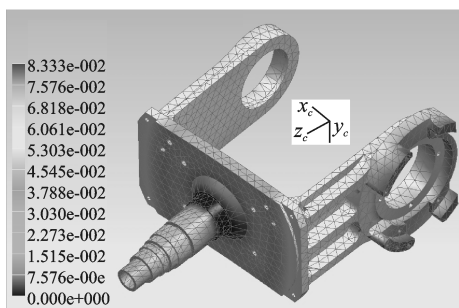


图 8 照准架热分析仿真图

### 2.2.3 照准架的模态分析和热分析

模态分析是对结构动态特性的解析分析和实验分析,其结构动态特性用模态参数表示。在数学上,模态参数是力学系统运动微分方程的特征值和特征向量;在试验方面,则是试验测得的系统固有频率、阻尼和振型<sup>[14]</sup>。有限元模态分析主要是计算照准架的固有频率和振型,确保其各阶谐振频率不与飞机的固有频率重合以避免发生共振现象。图 7 为照准架模态分析图,可见其一阶频率为 415 Hz。根据总体设计,飞机的固有频率为 200 Hz。可见照准架不会与飞机发生共振,结构可以满足机载环境的振动要求。

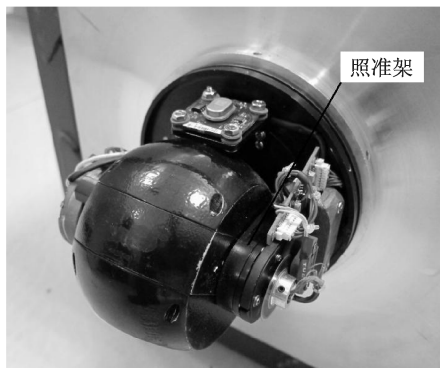


图 9 平台的外观图

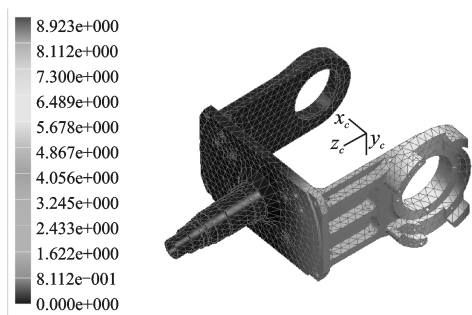


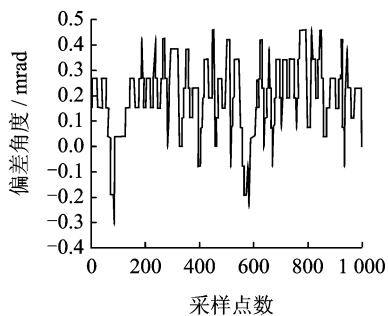
图 7 照准架模态分析图

照准架需要满足国军标的环境适应性要求,其温度的变化范围很大,所以对其进行热分析是必要的。图 8 为照准架热分析仿真图,照准架在 120 °C 温度载荷作用下最大变形量为 0.083 mm,能够满足使用要求。

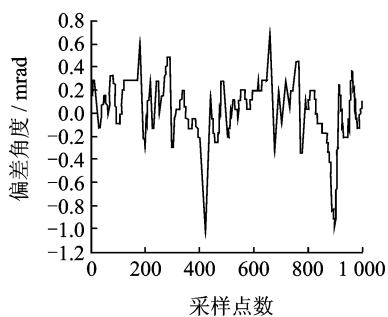
## 3 试验结果

照准架在优化后进行了加工和装配。图 9 为照准架装配在稳定平台上的外观图。对照准架性能以整机指标进行了考核——对稳定平台振动和高低温试验后的稳定精度和测角精度进行了检测。两轴摇摆台的横滚和俯仰框架同时以 3°/s,0.166

Hz 摇摆,测量平台横滚轴系和俯仰轴系转角与摇摆台转角的偏差,数据如图 10 所示。其中,横坐标为采样点数,共 1 000 个采样点,纵坐标为偏差角



(a) 横滚方向



(b) 俯仰方向

图 10 稳定精度的数据曲线图(采样 1000 个测试点)



度,单位为  $\text{mrad}$ 。对实验数据进行统计分析,得到的均方根值即为平台横滚轴系和俯仰轴系的稳定精度。测角精度采用经纬仪对平行光管的读数与平台读数对比的方法,图 11 为测角精度的现场检测图。经试验测得,横滚方向和俯仰方向的稳定精度分别为  $0.15 \text{ mard(RMS)}$ 、 $0.28 \text{ mrad(RMS)}$ ,测角精度为  $1.5 \text{ mrad}$ 、 $3.2 \text{ mrad}$ ,满足总体要求。图 12 为在外场飞行试验时拍摄的图片,图片效果清晰。

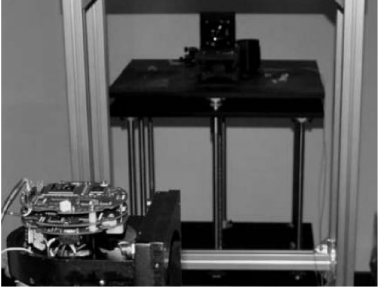


图 11 测角精度的现场检测图



图 12 外场试验图

## 4 结 论

(1)对照准架的结构形式进行了设计,建立了横挂照准架的力学模型,并对该模型进行受力分析,得出照准架的受力分布情况。

(2)利用 UG 软件对照准架进行了三维建模,并进行了有限元静力学分析与优化设计。优化后照准架的质量从  $126 \text{ g}$  减少到  $88 \text{ g}$ ,质量减小近  $30\%$ ,有利于超小型平台的轻量化。

(3)建立了照准架的动力学模型,对照准架进行了模态分析和热学分析,提高其固有频率,使其一阶频率达到  $415 \text{ Hz}$ ,远大于飞机的频率;热学分析结果表明最大变形量为  $0.083 \text{ mm}$ ,对平台精度影响很小。

(4)通过振动试验、高低温试验、摇摆台试验以

及外场试验,对稳定平台的性能指标进行检测。结果表明,照准架结构的优化设计能够满足指标要求。这种优化设计的方法也适用平台其他框架部分的设计。

## 参考文献:

- [1] 王帅. 一种作为微型无人机有效载荷的微型红外传感器[J]. 光机电信息, 2010, 27(2): 1-8.  
Wang Shuai. A micro-infrared sensor of valid load for micro-UAVs[J]. OME Information, 2010, 27(2): 1-8.
- [2] Ibrahim A W N, Pang W C, Gerald S G L, et al. Moving objects detection and tracking framework for UAV-based surveillance [C]//2010 Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology. [S. l.]:IEEE, 2010: 456-461.
- [3] Chao H Y, Austin M J, Han Y D, et al. Aggieair: towards low-cost cooperative multispectral remote sensing using small unmanned aircraft systems[C]//Advances in Geoscience and Remote Sensing. Vukovar, Croatia:IN-TECH, 2009: 463-490.
- [4] Yi L, Juha H, Anttoni J. Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 426-430.
- [5] Sheng H, Chao H Y, Cal C, et al. Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: platform, calibration and applications[C]// 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA). [S. l.]: IEEE, 2010:38-43.
- [6] 高同跃, 龚振邦, 罗均. 超小型无人机数据链的现状[J]. 飞航导弹, 2005(9):53-55.  
Gao Tongyue, Gong Zhenbang, Luo Jun. The actuality of data chain of small UAVs[J]. Aeroplane Missile. 2005(9):53-55.
- [7] 薛丹. 光电稳定平台框架结构探讨[J]. 光机电信息, 2011,28(03):33-36  
Xue Dan. Study on multi-structures of gimbals for electro-optical reconnaissance platform[J]. OME Information, 2011, 28(03):33-36.
- [8] Masten M K. Inertially stabilized platform for optical imaging systems[J]. Control Systems, IEEE, 2008, 8(1):47-64.
- [9] Hilkert J M. Inertially stabilized platform technology Concepts and principles[J]. Control Systems, IEEE, 2008, 28(1):26-46.

- [10] Zhou X Y, Yu R X, Li J P, et al. Structure optimal design of roll gimbal for an aerial three-axis ISP based on FEM modal analysis[C]// 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). [S. l.]: IEEE, 2011:373-376.
- [11] 甘至宏, 张葆, 撒芑芑. 机载光电稳定平台框架结构工程分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2441-2446.  
Gan Zhihong, Zhang Bao, Han Pengpeng. Engineering analysis of airborne optoelectronic platform frame structure[J]. Opt Precision Eng, 2008, 16 (12): 2441-2446.
- [12] 洪如瑾. UG NX4 高级仿真培训教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- Hong Rujin. Tutorial cultivate of advanced simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [13] 王平, 张葆, 程志峰, 等. 变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 893-898.  
Wang Ping, Zhang Bao, Cheng Zhifeng, et al. Optimal design of cam structure of zoom lens[J]. Opt Precision Eng, 2010, 18(4):893-898.
- [14] 杨洪涛, 贾继强. 机载光电平台内框架刚度及模态有限元分析[J]. 计算机仿真, 2005, 22 (11): 311-314.  
Yang Hongtao, Jia Jiqiang. Finite element modality and stiffness analysis of airborne electro-optical platform inner-gimbal[J]. Computer Simulation, 2005, 22(11):311-314.

