

一种多旋翼无人机弹簧夹持式云台设计*

鲁志超^{1,2}, 宋朝阳³, 李广^{1,2}, 张梦飞^{1,2}, 韩文霆^{1,4}, 陈香维⁵

- (1.西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;
- 2.农业部农业物联网重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
- 3.西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100;
- 4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
- 5.西北农林科技大学 食品科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:针对传统无人机云台直接与无人机螺钉固定连接,且每种特定相机、监测器云台需要固定位置都无法统一的问题,设计了一种弹簧夹持式云台,其利用了弹簧的伸缩性,可施加外力改变夹持部位的角度,实现云台与无人机的快速安装和拆卸。为研究确定弹簧夹持式云台的可行性,建立了云台整体三维模型,对云台材料进行了选择,利用 ANSYS Workbench 对云台系统进行了静力学载荷分析和动力学模态分析。分析结果表明:弹簧夹持式云台具有较好的稳定性和可靠性,为提高无人机与云台接触部位互换性提出了理论参考。

关键词:无人机;弹簧夹持;有限元分析;互换性

中图分类号:S24 文献标识码:A 文章编号:1001-2354(2019)10-0018-06

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2019.10.004

Design of the spring-clamping platform for the multi-rotor UAV

LU Zhi-chao^{1,2}, SONG Chao-yang³, LI Guang^{1,2}, ZHANG Meng-fei^{1,2}, HAN Wen-ting^{1,4},
CHEN Xiang-wei⁵

- (1.School of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100;
- 2.Key Laboratory of Agriculture Internet of Things, Ministry of Agriculture, Yangling 712100;
- 3.School of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100;
- 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100;
- 5.School of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100)

Abstract: Since the traditional UAV pan/tilt is directly connected with the UAV screws, and each specific camera and the monitor pan/tilt needs to be located in a fixed position, a spring-clamping platform is developed. The flexible spring is applied by the external force, in order to change the angle of the clamping part, so that the platform can be quickly installed and disassembled on the UAV. In order to explore the feasibility of the spring-clamping platform, an overall three-dimensional model is worked out, and the materials are selected. The ANSYS Workbench is used to conduct the static load and dynamic modal analysis of the platform. The results show that the spring-clamping platform is stable and reliable, which provides theoretical reference for improving the interchangeability between UAV and the contact parts of the platform.

Key words: UAV; spring clamping; finite element analysis; interchangeability

近几年来,基于微小型无人机的遥感信息获取技术应用广泛于农情监测。采用微小型无人机获取作物、地形等信息,相比于传统卫星遥感具有运行成本低、灵活性高、实时快速等特点,逐渐成为精准农业发展的重要方向^[1]。

小型无人机在遥感信息获取过程中,由于外界干

扰(如气流扰动),电机转动引起无人机整体发生振动,相机等传感器就会随之振动,使相机视轴晃动^[2]。为了避免相机视轴抖动,导致获取的图像发生畸变,需要稳定云台隔离机体扰动,提高成像质量。

随着农情监测所需精度的不断提高,稳定云台的研究也慢慢深入系统,分析目前云台的国内外研究主

* 收稿日期 2018-10-02 修订日期 2019-04-12

基金项目 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0403203) 陕西省水利科技资助项目(2017SLKJ-7)

要包括以下4个部分:云台控制系统研究、结构设计研究、任务载荷研究、控制算法研究^[3]。云台控制系统研究方面:吴益飞等^[4]设计了一种基于双MSP430单片机的云台控制系统,大大降低了系统功能模块之间的耦合度,研究结果表明该系统具有调速范围宽,成本低,安全可靠等优点;郭阳志^[5]针对云台的姿态检测和电机的矢量控制进行了研究,采用磁场定向控制作为永磁同步电机的驱动方式,姿态检测和电机控制单元采用单独微控制器控制,相互之间通过IIC通信的方式协调动作,提高了系统的精度和稳定性。机载云台结构设计研究方面:王纯阳^[6]设计了一种单载荷光电稳定平台,利用ANSYS Workbench进行了有限元分析,在结构符合强度的前提下,对云台进行了轻量化设计;李创等^[7]提出了一种云台轻量化设计的方法,通过空间多点悬挂、多轴系框架闭环最大程度地减少云台框架与载荷的占重比,从而减少云台整体的质量。云台控制算法研究方面:梁丽勤等^[8]设计了一种自适应模糊PID控制算法,以AVR单片机为核心,采用ICCAVR编写C程序,这种设计不仅省力,而且可以克服人工操作难度大、延迟大不稳定的缺点;郭炳坤^[9]针对经典PID结构简单,不能满足复杂系统控制精度要求等问题,提出了PSO优化的三轴稳定云台模糊PID控制系统,系统引入了Kalman滤波技术,结果表明此控制算法可以抑制系统的控制噪声,系统误差有效减少。针对云台任务载荷研究方面,杨贵军(2015)研发了一套农业多载荷无人机遥感辅助小麦育种信息获取系统。该系统基于多旋翼无人机平台,并集成高清数码相机、多光谱仪、热像仪等多载荷传感器,提出了无地面控制点条件下的无人机遥感数据几何精校正模型,实现多载荷遥感数据几何校正。综合以上分析和研究,目前云台系统已经可以做到准确控制、结构稳定、算法可靠。

文中在现有云台研究的基础上,设计了一种弹簧夹持式云台,使云台方便拆卸,提高云台与无人机连接部位的互换性,利用ANSYS Workbench对此云台进行静力分析、模态分析。通过仿真验证云台整体运动情况、各部分结构刚度、共振情况等。

1 云台总体设计

1.1 云台载荷选择

文中以农情监测常用的MicaSense RedEdge-M五通道多光谱相机为研究对象,此相机设计紧凑、体积

小,能同时捕捉5个不连续光谱带,图1为此相机的外形图,表1为此相机的参数。



图1 MicaSense RedEdge-M多光谱相机

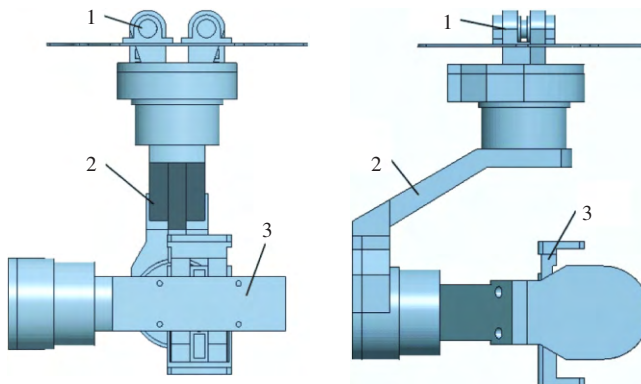
表1 MicaSense RedEdge-M多光谱相机参数

多光谱相机参数	参数值
型号	MicaSense RedEdge-M
质量/g	180
尺寸/mm	940×630×460
视轴/(°)	47.2
地面采集距离	120万/波段

云台整体结构设计时依据此相机尺寸,运动仿真、静力学、动力学仿真按照该相机的质量、重心设置。

1.2 云台结构设计

弹簧夹持式云台可以实现横轴、纵轴、俯仰轴的三维运动,其结构图如图2所示。为了满足云台方便拆卸,文中利用弹簧的伸缩性,通过施压无人机与云台连接部位的夹持件,改变其位置角度,进而改变夹持件在卡槽内的位置,达到安装、拆卸的目的。



(a)弹簧夹持式云台正视图 (b)弹簧夹持式云台侧视图

1 夹持结构;2 三维运动结构;3 相机固定结构

图2 弹簧夹持式云台结构图

弹簧夹持式云台主要结构如下:

(1)夹持结构。一端与无人机直接固定连接,另一端与云台夹持连接,起到承载整个云台系统的作用,并且可以通过改变夹持件的角度,方便完成云台的安装、拆卸。

(2)三维运动结构。完成云台横轴、纵轴、俯仰轴3个坐标轴的旋转运动,各关节装配无刷电机,确保云台的位移补偿,并且可以保护、隐藏线路和电路板。

(3)相机固定结构。完成矩形不同大小相机、传

传感器的固定,起到保护相机、传感器不受外界干扰的作用。

1.2.1 云台整体结构的材料选择

目前云台常用的材料主要有 3 种,第 1 种是铝合金,第 2 种是碳纤维,第 3 种是光敏树脂,表 2 为现有云台材料的物理特性参数。

表 2 云台材料物理特性参数

材料	密度/(g/cm ³)	弹性模量/MPa	泊松比 μ
铝合金	2.7	69×10 ³	0.3
碳纤维	1.62	110×10 ³	0.31
光敏树脂	1.2	2 400	0.41
碳钢	7.8	200×10 ³	0.28
铸铁	7.2	150×10 ³	0.25
合金铜	8.9	210×10 ³	0.3

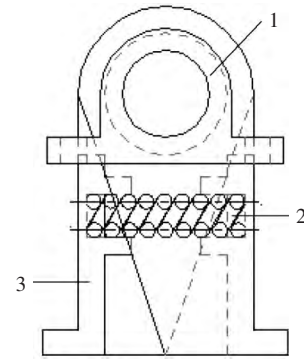
夹持结构连接无人机与云台,是整个系统的关节,是材料要求最高的地方,所以选用铝合金刚度较大的材料,保障整个系统的安全性;云台减振板材料选取碳纤维,质量轻巧且弹性好;三维运动结构中,顶盖需要加工一个卡槽,夹持结构会与卡槽进行配合,此卡槽在顶盖内部,且是一种带有弧度的槽,加工难度较大,所以选择 3D 打印完成卡槽的加工,为了满足此零件的硬度,设计时特意加大了此零件的厚度;相机固定结构需要固定、保护相机或传感器,确保安全、准确的监测,所以选择铝合金材料。零件材料匹配如表 3 所示。

表 3 零件材料匹配

零件名称	材料名称
夹持杆	Al 合金
俯仰轴悬转臂	Al 合金
电路安装盒	Al 合金
电路安装盒盖子	ABS
弹簧固定底座	Al 合金
滑杆	Al 合金
滚针轴承	2Cr13
减振板	CNF

1.2.2 云台夹持结构的设计

夹持结构(如图 3)主要零件包括滚针轴承、弹簧和夹持杆。为了提高轴系回转精度,轴系回转点采用精密滚针轴承,同时两夹持杆配合滚针轴承,中间搭载压缩弹簧,利用弹簧的伸缩性施加外力改变夹持杆的角度,使夹持杆可以匹配到卡槽中,完成云台与无人机的安装、拆卸。考虑到夹持结构连接无人机与云台,承载整个云台的质量,所以该研究同时采用了两个夹持结构共同承载整个云台,提高了系统的稳定性。



1 滚针轴承;2 弹簧;3 夹持杆

图 3 夹持结构

1.2.3 云台三维运动结构设计

三维运动结构主要零件包括纵轴和俯仰轴悬转臂和电路安装壳。纵轴、俯仰轴旋转臂完成云台横轴、纵轴、俯仰轴 3 轴方向的转动,设计时旋转臂一侧留有走线槽,且采用单臂设计,一方面可以固定、保护无刷电机线路,使云台系统整体更干净、简洁。另一方面可以减少旋转臂的质量,从而减少云台整体的质量,从结构设计方面提升微小型无人机的续航能力。电路安装壳完成电路板的安装,将电路板密封安装,避免杂质灰尘和湿气影响电路正常工作,电路板内置使云台整体系统更美观。

1.2.4 云台相机固定结构设计

相机固定结构主要零件包括弹簧固定底座和滑杆。相机固定结构主要作用是对相机、传感器进行固定和保护。为了使相机固定结构可以适应更多的相机、传感器,利用弹簧的伸缩性,将弹簧固定在弹簧固定底座中,滑杆通过压缩弹簧在底座卡槽中产生位移,从而改变夹持距离,满足要夹持相机、传感器的宽度,这样使弹簧夹持式云台适用更多的相机、传感器,增加了云台系统的通用性。夹持部位用黏结剂粘贴橡胶,加大夹持部位与相机、传感器之间的摩擦力,使夹持更加牢靠。

1.3 载荷力矩计算

云台系统的载荷力矩主要有惯性力矩、重力不平衡力矩、摩擦与导线等干扰力矩^[10]。

(1) 惯性力矩。

惯性力矩是用来判断一个物体在受力矩作用时,容不容易绕中心轴转动的数值,简化飞机姿态变化曲线为正弦函数,惯性力矩计算公式为:

$$M_{\alpha} = J\alpha \quad (1)$$

式中: J ——转动惯量;

α ——最大角加速度, $\alpha = |s''| = 4A^2\pi^2f^2s$;

s ——飞机飞行距离, $s = A \sin(2\pi ft + \varphi)$;

A ——飞机飞行最大幅度;
 f ——姿态频率;
 t ——飞行时间;
 φ ——初相位。

(2)重力不平衡力矩。

重力不平衡力矩为回转体重心偏移回转线所带来的不平衡力矩和隔振系统传递的振动和冲击力矩,其具体计算为:

$$M_g = mg(n+1)e \quad (2)$$

式中: m ——回转体质量;

n ——振动附加加速度,文中取 0.3;

e ——重心偏移量。

(3)摩擦与导线转矩。

摩擦力矩 M_f 主要为各元器件轴承启动运行时摩擦力引起的非线性干扰力矩,导线转矩为导线弹性引起的干扰力矩。

(4)电机力矩。

电机额定力矩为:

$$M = k(M_g + M_f) + M_e \quad (3)$$

式中: k ——安全系数,文中取 2;

M_e ——导线干扰力矩。

1.4 云台结构的装配

将各零件在 Creo 中进行装配,其中轴系零件按照销连接,滑杆按照滑块连接,其他位置进行刚性连接,确保装配体各零部件之间没有干涉后,对云台整体进行质量分析和运动仿真。云台系统总体质量约 111 g,横轴最大旋转角度 $\pm 45^\circ$,纵轴最大旋转角度 $\pm 30^\circ$,俯仰轴最大旋转角度 $\pm 30^\circ$ 。

结果表明:云台整体质量轻巧,满足微小型无人机组载重范围,云台各旋转轴臂可以达到要求角度旋转。

2 结构分析

2.1 基于有限元载荷分析

文中将 Creo 装配体模型导出为 IGS 格式,导入到 ANSYS Workbench 中进行有限元分析,按照表 2 将各结构部位材料赋值,网格划分时候采用 Solid186 高阶单元进行划分,控制 body sizing 大小为 5 mm,网格划分模型节点 Nodes 总数为 74 318 个,单元 Elements 总数为 33 149 个。模型插入载荷过程中,加入了标准地球重力加速度,云台承载的相机质量 180 g,并且减振板增加固定约束,模拟云台系统与无人机的固定连接。

图 4 为云台网格划分结果和载荷施加结果,图 5 为云台总变形和等效应变。

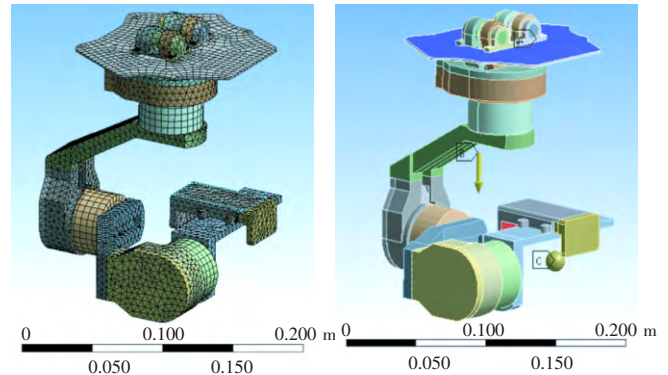


图 4 网格划分结果及载荷施加结果

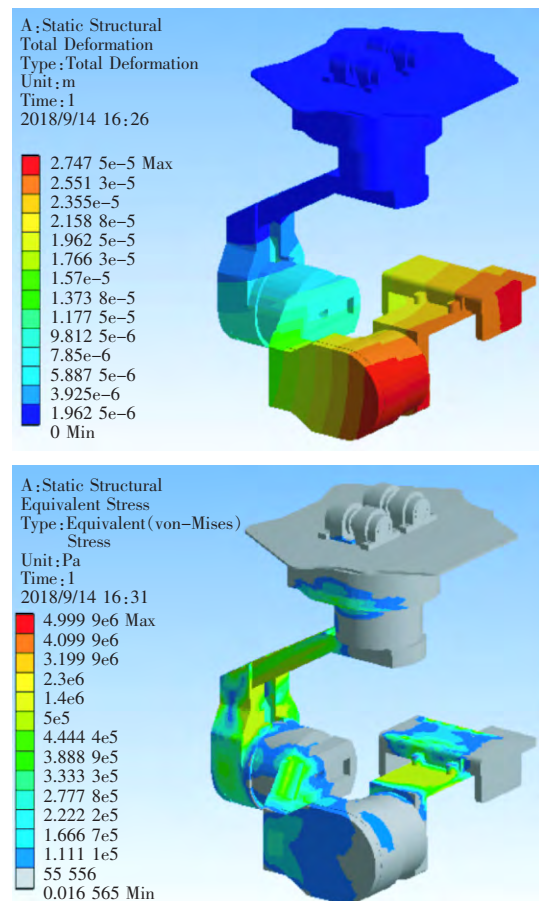


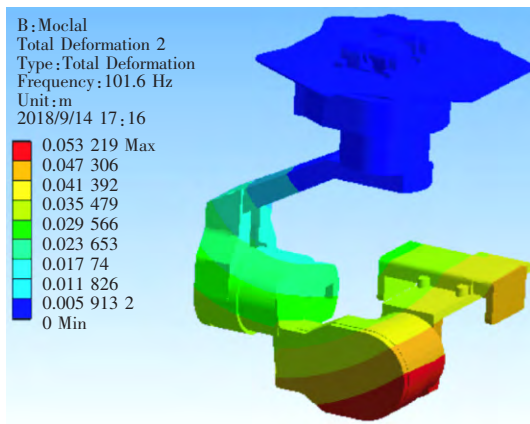
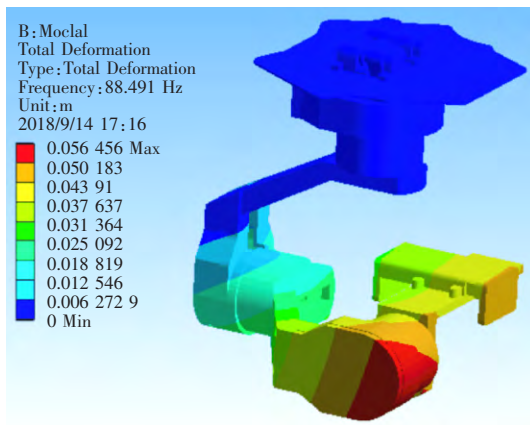
图 5 云台总变形和等效应变

由图 5 云台总形变图可以看出,相机、传感器放置位置形变最大,最大形变为 $2.747 5 \times 10^{-5} \text{ m}$,此形变大小可以忽略不计,从等效应力图可以看出,最大应力在云台弹簧夹持部位和各悬转臂处,最大应力为 5 MPa,而在材料选择时,这些部位选择了刚度较大的铝合金,其屈服强度为 255 MPa,远远大于云台受力时的等效应力,说明云台结构稳定、牢靠。

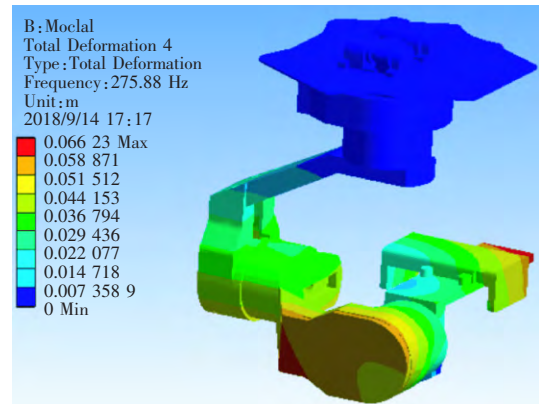
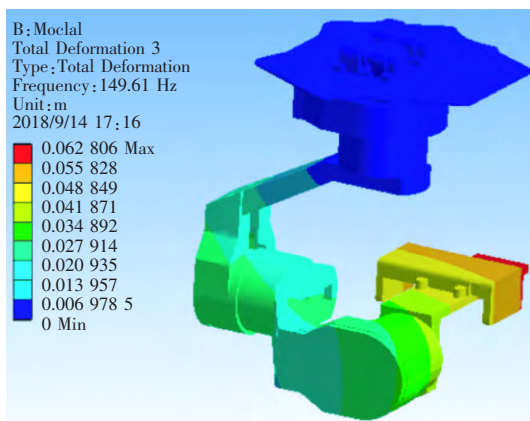
2.2 基于有限元模态分析

无人机,尤其是多旋翼无人机,在飞行过程中电机

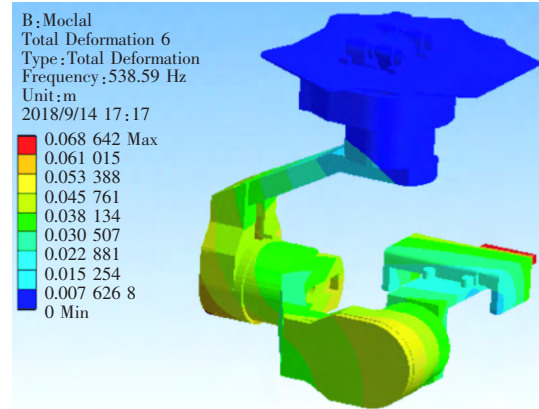
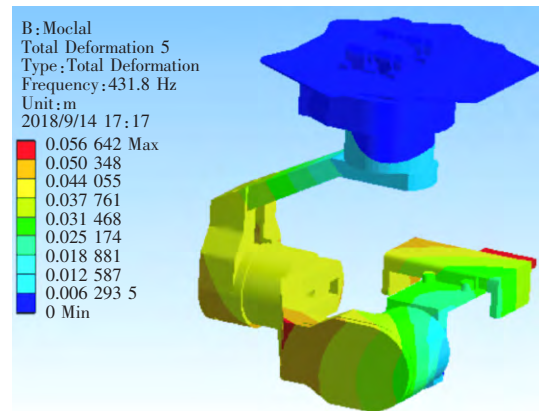
和螺旋桨通过周期性的旋转会产生周期性的振动载荷,可以通过机身传递至无人机云台上^[11]。根据受迫振动理论,当产生受迫振动的物体结构自身固有频率接近于传递的激振频率时,此物体就会产生共振。无人机云台上搭载了传感器、电机等器件,这些物体对结构的振动比较敏感,过于强烈的振动会对这些部件正常工作造成影响,从而影响相机的成像质量,所以很有必要对云台进行动力学分析,用来评估所设计云台结构的合理性。云台动力学分析主要是模态分析,需要确定结构固有频率和振型等模态参数。图 6 是云台的 6 阶模态云图,表 4 为各阶模态频率值。



(a)1 阶模态和 2 阶模态



(b)3 阶模态和 4 阶模态



(c)5 阶模态和 6 阶模态

图 6 6 阶模态云图

表 4 模态频率表

模态	频率/Hz
1	88.91
2	101.6
3	149.61
4	275.88
5	431.8
6	538.59

在实际情况下,传递给云台的振动频率一般集中在 50~70 Hz 之间^[12],由图 6 和表 4 可以看出,1 阶模态频率为 88.91 Hz,超过这个范围,说明无人机振动过程中,不会与云台发生共振,说明云台结构设计合理。

3 结束语

通过 Creo 设计了一种弹簧夹持式云台,对云台各部分结构设计、材料选择进行了详细说明,并利用 ANSYS Workbench 软件对其进行静态模拟和动态模拟,结果表明云台系统结构稳定,不会产生共振,结构设计合理,从理论上验证了弹簧夹持式云台的合理性,为提高无人机与云台接触部位互换性提出了理论参考,为弹簧夹持式云台实物加工提供了参考。

参考文献

- [1] 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报,2014,30(18):1-12.
- [2] 孟恭. 无人机视觉稳定云台系统设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [3] 王紫军. 小型多光谱相机无人机云台系统研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2017.
- [4] 吴益飞,李胜,蔡骅. 基于 MSP430 单片机的云台控制系统设计与实现[J]. 微计算机信息,2006(20):90-93.
- [5] 郭阳志. 基于 ARM 的增稳云台姿态控制系统研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2015.
- [6] 王纯阳. 多旋翼无人机用单载荷光电稳定平台结构设计[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2015.
- [7] 李创,郝小鹏,耿动梁,等. 基于空间多点悬挂机载云台的轻量化设计分析[J]. 机械设计与研究,2017,33(1):194-197.
- [8] 梁丽勤,逯叶,张宝健. 基于自适应控制无人机摄影云台的设计[J]. 机电产品开发与创新,2011,24(1):174-175.
- [9] 郭炳坤. 无人机三轴稳定云台智能控制算法的研究[D]. 厦门:集美大学,2013.
- [10] 魏文菲,张春元,李超,等. 某四旋翼飞行器机架的模态分析[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(2):40-42.
- [11] 刘峰,高鸿渐,喻辉,等. 基于有限元的四旋翼无人机碳纤维结构优化设计与固有模态分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2017(4):17-23.
- [12] 任航. 基于微型无人机的遥感信息获取关键技术研究[J]. 北京测绘,2016(6):53-55.

作者简介:鲁志超(1994—),男,硕士,研究方向:无人机云台。

E-mail:419400985@qq.com

韩文霆(通信作者)(1972—),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事无人机遥感与精准灌溉技术研究。

E-mail:hanwt2000@126.com