

文章编号 1004-924X(2018)11-2754-10

轻小型无人机云台机电多目标优化

周向阳^{1, 2, 3*}, 朱 军^{1, 2}, 时延君^{1, 2}

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 惯性技术重点实验室, 北京 100191;

3. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:轻小型多旋翼无人机云台是一种复杂机电伺服系统,要求兼具轻质量与快响应等机电特性。本文针对传统方法在机电伺服系统中设计的不足,以轻小型多旋翼无人机云台为研究对象,提出一种针对系统带宽的机电多目标优化设计方法。方法中,系统结构部分通过灵敏度分析得到 7 个尺寸设计参数,并以一阶模态和质量为目标进行优化;系统控制部分以速率环和位置环控制器参数为设计变量,并以上升时间、调节时间和绝对积分误差(Integral Absolute Error, IAE)为目标进行优化。在优化设计中,将近似模型与多目标遗传算法相结合,以降低优化复杂度、并提高优化效率及全局寻优能力。对方法进行仿真分析,结果表明:相比初始结构系统和控制系统模型,采用机电多目标优化设计方法后,结构部分质量降低了 8.8%,控制部分 IAE 型积分误差、调节时间及上升时间等主要性能参数分别降低了 54.8%、81.9%和 53.4%。最后采用锤击法对云台结构进行模态实验,实验得到的一阶模态频率与优化结果的误差为 13.4%。说明提出方法可有效实现云台系统机电总体多目标优化。

关键词:轻小型云台;机电多目标优化;近似模型;带宽

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182611.2754

Multi-objective optimization on mechatronic system of a light and small pan-tilt system for unmanned aerial vehicle application

ZHOU Xiang-yang^{1,2,3*}, ZHU Jun^{1,2}, SHI Yan-jun^{1,2}

(1. School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Science and Technology on Inertial Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail:xyzhou@buaa.edu.cn

Abstract: The light and small pan-tilt system of a multi-rotor unmanned aerial vehicle is a complicated electromechanical servo system that requires a number of desirable properties such as light weight and rapid response to be realized. We focus on the inherent limitations of the traditional methods in the electromechanical servo-system design to present a multi-objective optimization method for a

收稿日期:2018-03-22;修订日期:2018-05-02.

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(No. 51775017, No. 51375036);北京市自然科学基金面上项目资助(No. 3182021);机械制造系统工程国家重点实验室开放课题研究基金资助项目(No. sklms2018005)

mechatronic system based on the bandwidth. For the structure system, seven-dimensional parameters were selected using sensitivity analysis in which the mass and first-order natural frequency are considered as the optimization goals. For the control system, the controller parameters in the rate and position loops are selected as design variables in which the rise time, regulating time, and integral absolute error (IAE) are considered as the optimization goals. In the optimization process, an optimization method that combines the approximation model and multi-objective genetic algorithm is proposed to reduce the complexity, improve the efficiency, and improve the overall optimization ability during the optimization process. Simulations are then conducted to verify the proposed method. The results show that, compared with the original model of the control and structure systems, the mass, IAE, regulating time, and rise time are reduced by 8.8%, 54.8%, 81.9%, and 53.4%, respectively. Finally, a modal pan-tilt experiment is carried out by hammering, and the error in the experimental and optimization results is found to be 13.4%. Therefore, the optimization method is effective.

Key words: light and small pan-tilt; electromechanical multi-objective optimization; approximate model; bandwidth

1 引言

轻小型多旋翼无人机因其获取影像机动灵活、影像分辨率高、成本低等优点,成为传统航空摄影测量手段的有效补充,目前已在测绘地理信息、防灾减灾、反恐维稳、农业估产、水电工程、公路勘探等军民重要领域得到了广泛应用^[1]。轻小型多旋翼无人机航摄系统中,云台系统作为关键设备之一,承受并稳定成像载荷,通过实时伺服控制,有效隔离无人机载体内外的各种扰动,保证成像载荷视轴准确跟踪目标,并有效避免了成像载荷抖动造成的成像质量退化^[2-4]。

轻小型无人机云台由结构和控制两个子系统组成,进行机电系统多目标联合优化设计时,需要考虑两个子系统之间的耦合关系。文献[5]对混合驱动柔索并联机器人的结构系统控制系统进行集成优化设计;文献[6]提出通过对模态机电耦合函数的优化寻求压电片电极的最佳离散方式和最佳连接方式;文献[7]采用面向控制系统的机构设计方法,分别在运动学、动力学层面上提出多个性能指标进行优化。

目前,数值优化方法结合仿真模型进行产品仿真优化是机电系统联合优化的主要方法,但随着仿真模型精确性和复杂性的提高,优化迭代设计过程中计算成本几何级数增长,导致优化设计不可行。因此,近年来,基于近似模型的优化方

法已经成为国内外学者研究的热点之一。文献[8]提出了一种响应面模型与多目标遗传算法相结合的优化设计方法;文献[9]基于动力学仿真建立了仿机器人的近似模型,并基于该近似模型实现了仿机器人的全方位步行参数优化;文献[10]采用响应面和遗传算法相结合,分别进行了翼型的单点和多点优化设计;文献[11]则针对翼型的气动和隐身性能,进行了基于神经网络和遗传算法的翼型多目标优化设计研究。

本文以轻小型多旋翼无人机云台为对象,针对云台系统的机电耦合效应和复杂仿真模型数值优化效率低的问题,提出一种基于带宽的机电联合优化方案,采用近似模型与基于精英策略的非支配排序遗传算法(Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)相结合的优化技术,从机电总体角度,对云台结构系统与控制系统进行联合优化,最后进行仿真分析和实验验证。

2 云台总体设计

2.1 系统构成

典型轻小型无人机遥感系统如图 1 所示,主要由轻小型无人机、成像载荷及云台系统组成。图 2 为云台的结构示意图,主要包括框架系统、驱动系统及传感器系统。框架系统采用三框架形式,由外到内分别为方位、横滚与俯仰。驱动系统对应于三框架的三转轴,采用 3 个力矩电机进行

驱动。传感器系统由航姿参考系统、三框架速率陀螺及加速度计等组成。



图 1 轻小型无人机遥感系统

Fig. 1 Remote sensing system of light and small UAV

云台具有伺服稳定和手控两种工作模式,在伺服稳定工作模式下,安装在云台环架上的陀螺敏感飞行载体角运动及云台内外部扰动引起的干扰角速度,通过控制电路输出相应控制信号,并经过驱动电路分别输出到 3 个电机,然后分别反向三框架转动,隔离扰动,使云台保持稳定;姿态参考系统提供姿态信息,云台根据这些信息计算云

台跟踪地理坐标系的指令角速度,形成电机控制信号,分别驱动三框架转动,使平台跟踪地理系;在手控工作模式下,系统根据成像载荷的图像反馈,通过上位机手动操作,实现大角度快速跟踪。

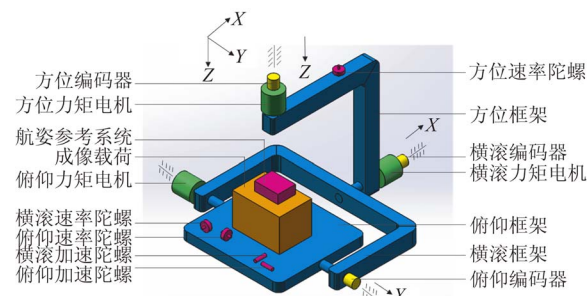


图 2 云台系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pan-tilt system

2.2 三环复合控制

如图 3 所示,云台采用基于 PID(Proportion Integration Differential)的三环控制结构,由电流回路(电流环)、稳定回路(速率环)和跟踪回路(位置环)构成,稳定回路包括电流回路、速率环控制器、力矩电机、框架结构以及速率陀螺反馈环节。

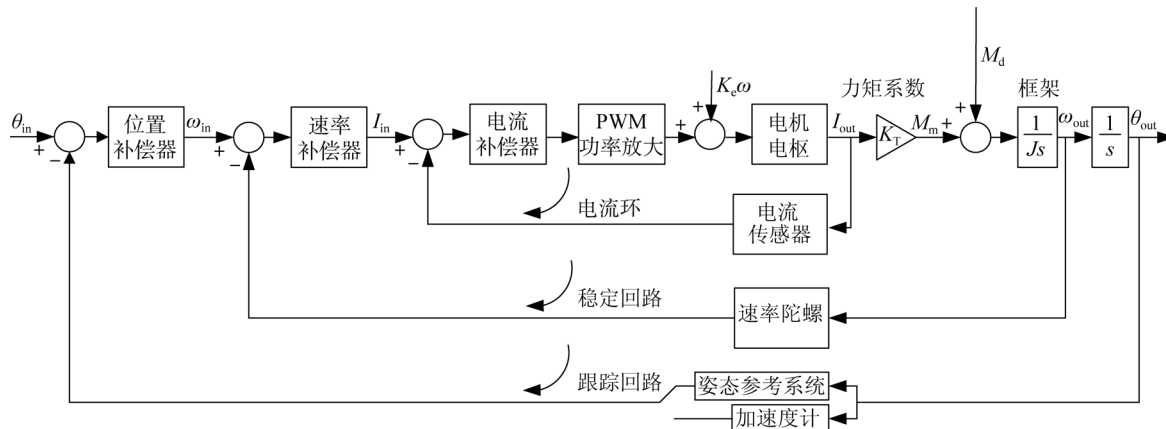


图 3 云台三环复合控制框图

Fig. 3 Three-loop compound control block diagram of pan-tilt

当飞机姿态发生变化及受到扰动时,陀螺敏感飞行载体角运动及云台内外部扰动引起的干扰角速度,通过控制电路输出相应控制信号,并经过驱动电路分别输出到电机,然后分别驱动框架转动,隔离扰动。跟踪回路包括稳定回路、位置环控制器及姿态参考系统反馈环节。姿态参考系统提供姿态信息,云台根据这些信息计算云台跟踪地理坐标系的指令角速度,形成电机控制信号,驱动

框架反向转动,使云台始终稳定跟踪目标。

2.3 主要控制要求

动态范围:俯仰为 $\pm 45^\circ$;横滚为 $\pm 45^\circ$;方位为 $\pm 100^\circ$ 。跟踪精度:0.5°(均方根 RMS)。

3 云台近似模型建立

系统设计过程中,为了使系统性能达到最优,

需要对系统进行优化。寻优过程是一个反复迭代的过程,优化算法尤其是智能优化算法,需要对大量设计点进行迭代计算。对于高度复杂的模型,不仅需要消耗大量的计算资源和时间,增加优化过程的不确定性,而且复杂模型的收敛性难以保证。而近似模型技术则可以显著提高优化效率和模型收敛性。因此,对系统进行优化,首先需要对系统内模型进行分析。通常所采用的近似模型方法包括响应面模型和人工神经网络技术。

对于本文中的云台系统,由于质量被飞行器载体承载能力和续航时间所限制需要尽可能最小化,一阶模态影响了系统响应的快速性和精度需要尽量提高,因此结构系统需要涉及质量模型和模态模型。其中模态模型是高度复杂的仿真模型,需要采用对复杂函数拟合效果较好的模型进行近似,质量仿真模型较为简单,可以采用简单高效的模型进行近似。控制系统的优化对象是基于 MATLAB 建立的数值模型,其本身就相当于实际控制系统的近似模型,因此不需要进行近似模型处理。

3.1 响应面模型

在响应面方法中,通常采用二次响应面函数:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum \beta_{1i} x_i + \sum \beta_{2i} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

设总试验次数为 m , 响应面模型可以用矩阵形式表示为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} = \hat{\mathbf{Y}} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2)$$

其中:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{Y} 和 \mathbf{X} 为观测值, $\hat{\mathbf{Y}}$ 为拟合值, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为拟合误差, 是一种随机噪声, 符合正态分布。由最小二乘法可知系数应使观测值 \mathbf{Y} 和拟合值 $\hat{\mathbf{Y}}$ 的二范数 Q 最小, 即:

$$Q = \sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (5)$$

根据矩阵微积分的相关知识可得系数向量的 $\boldsymbol{\beta}$ 无偏差估计为:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}. \quad (6)$$

3.2 径向基神经网络

与 BP 神经网络相比, 径向基神经网络的训练时间更短, 精度更高, 重复性更好^[12]。径向基神经网络是一种三层前向网络。其三层结构分别为: 输入层、中间层和输出层。从输入层到中间层控制的变换是非线性的, 而从中间层到输出层的变换是线性的。中间层单元的变换函数是径向基函数, 它是一种局部分布的对称中心点径向对称衰减的非负非线性函数, 其拓扑结构如图 4 所示。

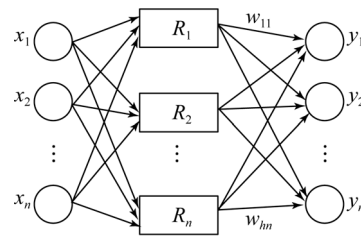


图 4 径向基神经网络拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of radial basis function neural model

从输入层到隐层的非线性变换即为从输入变量到非线性基函数的映射, 本文中的径向基函数为:

$$g(\mathbf{x}) = \| \mathbf{x} - \mathbf{x}_i \|^c, \quad (7)$$

式中: $\| \mathbf{x} - \mathbf{x}_i \| = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)$ 为欧式距离, c 为待求的形状参数。从隐层到输出层的线性变换为:

$$y_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} g_i(\mathbf{x}) + b_j, \quad (8)$$

式中 ω_{ij} 和 b_j 为待求系数。

其前向传播过程可表示为:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{G}(\mathbf{X}) \mathbf{E}, \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{B}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{X} 为 $[N, D]$ 矩阵, N 为样本数量, D 为输入层的维数, 在本文中为选择的尺寸参数个数。 $\mathbf{G}(\mathbf{X})$ 为对 \mathbf{X} 的每个元素进行 $g(\mathbf{x})$ 非线性变换, \mathbf{E} 为元素全为 1 的 D 阶方阵。 $\boldsymbol{\omega}$ 是 $[D, C]$ 矩阵, C 为输出层维数。 \mathbf{B} 为 $[1, C]$ 的矩阵, 为隐藏层到输出层的偏置变量。

其参数通过误差方向传播得到各参数梯度,

采用梯度下降法训练。其误差定义为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}, \quad (11)$$

式中: $\mathbf{E}, \mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}$ 都为 $[1, C]$ 矩阵, 通过求导的链式法则可以得到梯度 $\frac{\partial E}{\partial \omega}, \frac{\partial E}{\partial B}$, 通过梯度下降法迭代训练参数 (ω, B) 。

3.3 近似模型建立

3.3.1 设计参数

如图 5 所示, 通过灵敏度分析分别在俯仰组件、横滚组件、方位组件和基座选择了 7 个尺寸作为设计参数, 记为 $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]$ 。其中从俯仰组件选取 x_1 尺寸, 从横滚组件选取 x_2, x_3, x_4 尺寸, 从方位组件选取 x_5, x_6 尺寸, 从基座选取 x_7 尺寸。

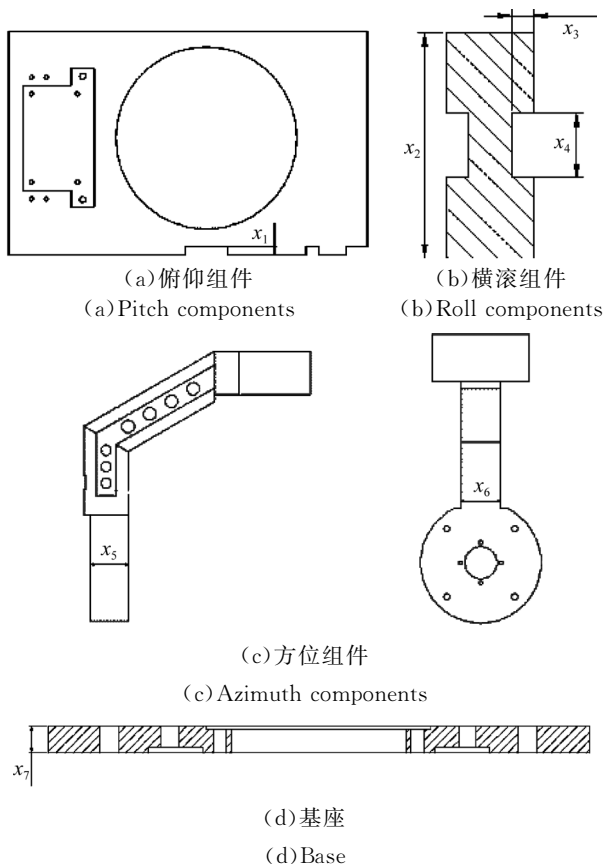


图 5 云台结构设计参数

Fig. 5 Design parameters of pan-tilt structure

3.3.2 质量近似模型

质量的仿真算法比较简单, 是关于体积的一次函数, 因此采用二阶多项式响应面模型。基于 ISIGHT 的优化仿真平台, 以拉丁超立方试验方法构造 70 个样本点作为设计矩阵, 得到云台质量的二阶多项式模型为:

$$y_{\text{mass}} = 4.979\ 01 - 0.001\ 12x_1 + 0.011\ 41x_2 - 0.006\ 91x_3 - 0.003\ 2x_4 - 0.074\ 1x_6 + 0.038\ 44x_7 + 1.863\ 03x_2^2 + 0.000\ 69x_3^2 + 0.000\ 14x_4^2 + 0.000\ 5x_6^2 - 4.982\ 17x_1x_2 + 4.184\ 24x_2x_3 + 4.563\ 09x_2x_6 - 0.001\ 23x_3x_4 + 0.001\ 87x_5x_6. \quad (12)$$

通过 R^2 误差 (R-square error) 评价模型的拟合度, 其计算公式为:

$$R\text{-Squared} = 1 - \frac{\sum (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}. \quad (13)$$

R^2 误差越接近 1 表示拟合度越好, 一般大于 0.9 表示拟合度较好。通过交叉验证方法取 10 个样本点进行误差分析, 得到该模型的 R^2 误差为 0.997, 拟合度很好, 可以采用。

3.3.3 模态近似模型

基于有限元法的模态分析方法是一种复杂高度非线性的模型, 基于最小二乘拟合的响应面并不适合拟合这种类型的模型。神经网络是一种适合拟合复杂的非线性关系的模型, 已经在许多领域取得了广泛应用。因此, 本文选择径向基神经网络模型对模态进行拟合, 与构造质量进行模型时的仿真条件一致。通过误差分析得到模型的 R^2 误差为 0.903, 拟合度较好, 可以采用。

4 结构系统多目标优化

4.1 优化算法

对于优化问题已经有许多算法被提出, 传统的方法中比较典型的有梯度下降法和牛顿法, 但是它们的优化原理决定了它们只能做局部优化。

相比于传统优化算法, 遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 一种广泛采用的高性能全局优化算法。而云台系统的优化问题是一个多目标优化问题, 多目标优化问题可以描述为公式 (14):

$$\min f(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x}))^T \mathbf{x} \in \mathbf{R}, \quad (14)$$

其中:

$$\mathbf{R} = \{ \mathbf{x} \in E^n \mid g(\mathbf{x}) = (g_1(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x}))^T \leq 0, h(\mathbf{x}) = (h_1(\mathbf{x}), \dots, h_l(\mathbf{x}))^T = 0 \}. \quad (15)$$

多目标优化问题的 Pareto 最优解定义为: 设 $\mathbf{x}^* \in \mathbf{R}$, 且满足不存在 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}$, 使得 $f(\mathbf{x})$ 的所有目

标函数不差于 $f(x^*)$,且至少存在一个目标函数,使得 $f_i(x)$ 优于 $f_i(x^*)$,则称 x^* 为多目标优化问题的 Pareto 最优解。对一个具体的多目标优化问题,一般存在多个 Pareto 最优解,即存在一个 Pareto 最优解集,在设计过程中根据具体问题的需要从 Pareto 最优解集选取,从而获得问题的优化解。而非支配排序遗传算法(Nondominated Solutions Genetic Algorithm,NSGA)通过引入非支配分层使遗传算法可以应用于 Pareto 最优的多目标优化问题。带精英策略的非支配排序遗传算法 NSGA-II 进一步对 NSGA 进行优化:提出了快速非支配排序算法,一方面计算的复杂度从 $O(mN^3)$ 降低到 $O(mN^2)$,其中 m 为优化目标数, N 为种群个体数;采用拥挤度和拥挤度比较算子,克服了 NSGA 算法需要指定共享半径的问题;引进精英策略,保证某些优良的种群个体在进化过程中不会被丢弃,从而提高了优化结果的精度,图 6 为 NSGA-II 算法的优化流程图。

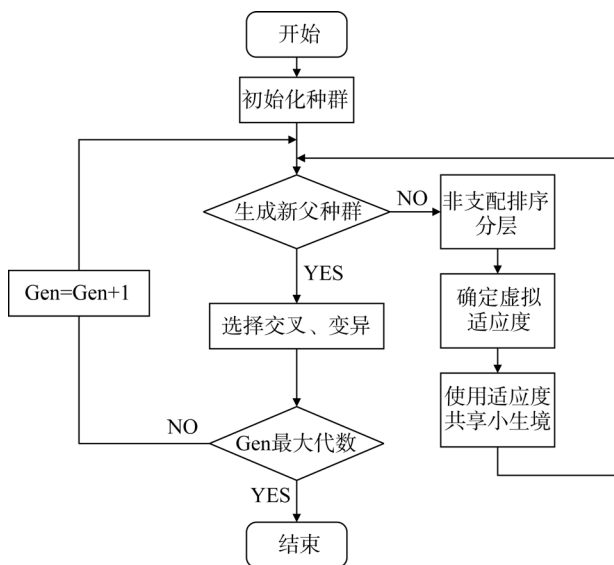


图 6 NSGA-II 算法的基本流程图

Fig. 6 Optimization flow diagram of NSGA-II algorithm

4.2 结构多目标优化

基于之前建立的质量和模态近似模型,通过 ISIGHT 软件构建结构多目标联合仿真优化仿真平台。具体的优化参数操作为:(1)将质量近似模型和模态近似模型的结果系数文件导入 ISIGHT 的近似组件;(2)添加优化过程组件,将设计尺寸参数在参数映射界面设置为输入参数,质量和模

态参数设为输出参数;(3)将优化方法设为 NSGA-II,设置设计参数变量的取值范围,将模态目标设为最大化,质量参数设为最小化;(4)运行优化过程组件,得到优化结果。

优化过程共经历了 241 个样本点,得到 21 个 Pareto 最优解。通过比较,选取其中一个 Pareto 最优解作为云台结构的最优设计参数样本点。相比于原始的云台结构,优化后的质量降低了 8.8%,模态提高了 6.3%。优化后的云台三维结构如图 7 所示。

表 1 优化后云台结构性能比较

Tab. 1 Performance comparison of optimized pan-tilt structure

性能指标	质量/kg	一阶模态/Hz
优化前	5.82	68.28
优化后	5.31	72.6
变化比例/%	-8.8	6.3

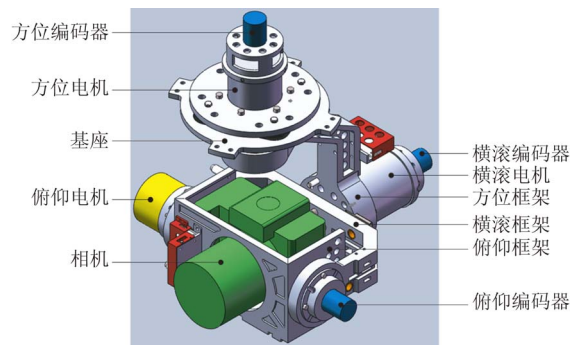


图 7 优化后的云台三维结构

Fig. 7 Optimized three-dimensional structure of pan-tilt

5 控制系统多目标优化

将优化后的云台结构系统模态作为控制系统优化设计的输入,对云台控制系统进行多目标优化,由于在结构系统与控制系统的优化设计之间存在模态作为耦合变量,因此整个过程可视为云台结构/控制系统联合多目标优化。

云台的 3 个框架的控制结构相似,均采用电流回路(电流环)、稳定回路(速率环)、跟踪回路(位置环)的三环控制结构,因此,下面以俯仰框为例介绍云台控制系统的仿真模型和初始控制参数整定过程。

5.1 基于带宽的控制系统建模

一般位置伺服系统开环特性的截止频率与闭环带宽有如下近似关系:

$$\omega_{bp} = 2\omega_{cp}, \quad (16)$$

选取:

$$\begin{cases} \omega_{cv} = (2 \sim 4)\omega_{cp} \\ \omega_R = (4 \sim 6)\omega_{cp} \end{cases}, \quad (17)$$

即可使内环等效特性满足外环设计要求。其中 ω_{cv} 为速度环开环截止频率, ω_{cp} 为位置环开环截止频率, ω_{bp} 为位置环的闭环带宽, ω_R 为系统机械谐振

频率。通过优化得到云台的一阶模态为 72.6 Hz, 考虑到实际传动、装配和材料等的影响, 云台实际的谐振频率将大大低于 72.6 Hz, 这里取云台实际的机械谐振为其十分之一, 即 7.26 Hz。由此取速率环和位置环的初始开环截止频率为:

$$\begin{cases} \omega_{cv} = 1/5\omega_R = 1.452 \text{ Hz} = 9.12 \text{ rad/s} \\ \omega_{cp} = 1/4\omega_{cv} = 0.363 \text{ Hz} = 2.28 \text{ rad/s} \end{cases}. \quad (18)$$

确定初始控制器参数, 图 8 为云台系统传递函数框图。

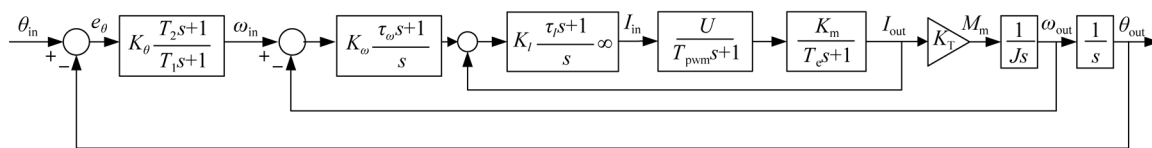
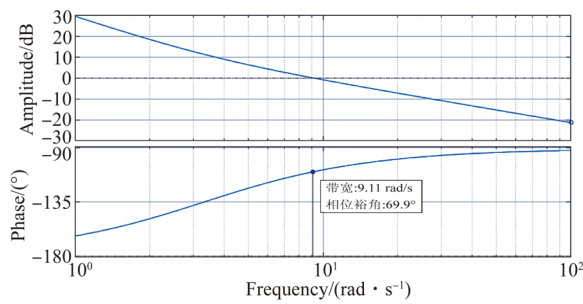


图 8 云台系统传递函数

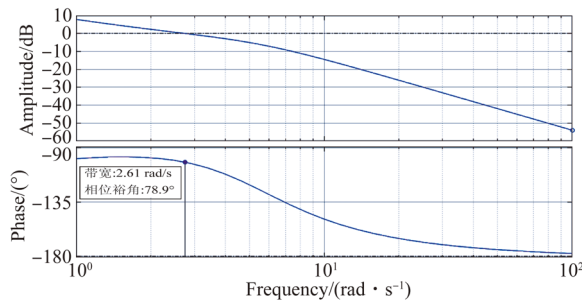
Fig. 8 Transfer function of pan-tilt system

由内到外 3 个环路分别为电流环、速率环和位置环。电流环和速率环串联 PI 校正环节, 位置环串联滞后校正环节。其中 $[K_\theta, T_1, T_2, K_\omega, \tau_\omega, K_i, \tau_i]$ 为待确定的控制器参数。通过基于经验的控制器参数设计方法, 计算得到 $[K_\theta=7.01, T_1=13.17,$

$T_2=4.39, K_\omega=6.414, \tau_\omega=0.301, K_i=0.00497, \tau_i=0.0012]$ 。仿真结果如图 9 所示: 速率环开环带宽为 9.11 rad/s, 开环相角裕度为 69.9; 位置环开环带宽为 2.61 rad/s, 开环相角裕度为 78.9, 满足设计要求, 可作为云台控制系统优化设计的初始点。



(a) 速率环
(a) Velocity loop



(b) 位置环
(b) Position loop

图 9 云台控制系统带宽初始校正结果

Fig. 9 Initial corrected result of pan-tilt control system

5.2 云台控制系统多目标优化

5.2.1 云台控制系统优化模型

目标向量 $[y_{err} \ t_r \ t_s]$ 能很好的反应控制系统的准确性、快速性和平稳性要求^[13], 其中 y_{err} 为 IAE 型误差指标, 即:

$$y_{err} = \int_0^\infty |e(t)| dt, \quad (19)$$

其中: t_r 为上升时间, t_s 为调整时间。该方案可获得满足决策偏好的多个 Pareto 最优解, 性能优于

单目标优化。因此本文中控制系统优化目标选择 $[y_{err} \ t_r \ t_s]$ 为目标函数。

根据稳定性要求和控制环路带宽限制, 将控制优化模型的约束条件设为:

$$\begin{cases} 60 \leq P_{m1} \leq 80 \\ 60 \leq P_{m2} \leq 80 \\ 1/6\omega_R = 3.8 \leq \omega_{cp} \leq 1/4\omega_R = 5.7 \\ 1/3\omega_R = 7.6 \leq \omega_{cv} \leq \omega_R = 22.8 \end{cases} \quad (20)$$

云台控制系统的性能主要受位置环和速度环的影响,因此主要研究位置环和控制环的控制参数。令速度环控制器的形式为 $\frac{K_w(s-t_w)}{s}$,位置环的形式为 $\frac{K_p(s-t_{p1})}{(s-t_{p2})}$,取 $[K_w, t_{w1}, K_p, t_{p1}, t_{p2}]$ 为优化设计变量,其初始值为 $[1.93, -3.32, 2.34, -0.0759, -0.227]$ 。

确定了优化目标、约束条件和设计变量,即完成了云台控制系统优化模型的设计。系统控制部分以速率环和位置环控制器参数为设计变量,并以上升时间、调节时间和绝对积分误差(Integral Absolute Error, IAE)为目标进行优化。

5.2.2 云台控制系统多目标优化

通过 ISIGHT 集成 MATLAB 可对建立的模型以 NSGA II 算法进行多目标优化。优化过程总共产生了 241 个优化点,得到 16 个 Pareto 最优解。通过综合比较,选取 222 号优化点作为最优设计点,相比于优化前稳态精度和动态性能都有了明显提升,具体如表 2。

表 2 云台控制系统优化前后性能对比

Tab.2 Performance comparison of optimized pan-tilt control system

性能指标	IAE	t_r/s	t_s/s
优化前	21.003	5.282	0.526
优化后	9.496	0.956 45	0.245 3
变化比例/%	-54.8	-81.9	-53.4

6 云台模态实验

图 10 为根据机械优化结果设计的云台结构。

为验证云台结构优化设计的准确性和控制系统带宽优化的合理性,进一步通过模态实验测量云台模态参数。由于本文中云台为轻小型结构,因此采用锤击法进行模态实验,图 11 为搭建的云台模态测试系统。选用的仪器型号为:Kistler9722A500 型小型力锤、Kistler8778A500 加速度传感器、NI 信号采集器和 Cutpro 分析软件。

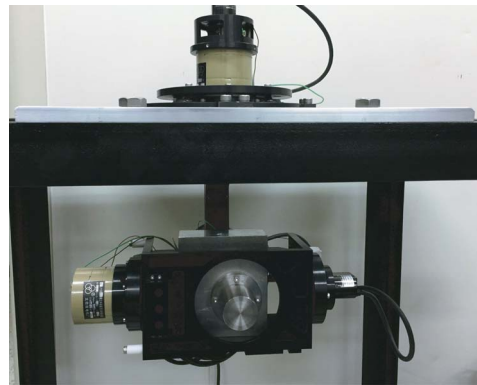


图 10 云台结构

Fig.10 Pan-tilt structure

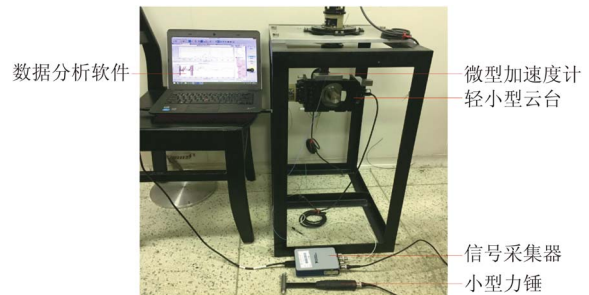


图 11 云台模态测试系统

Fig.11 Modal experiment system of pan-tilt

测试时将云台通过静态支架支承和固定,模拟实际工作情况。由于云台为三框架多体结构形式,为体现整体振动特性,测试点选择在作为最外框架的方位框架上,如图 12 所示。

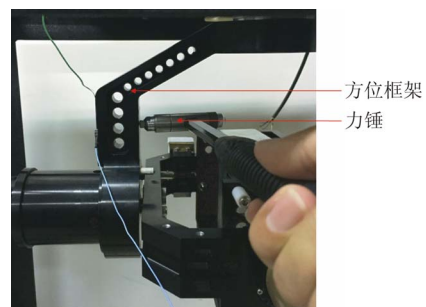


图 12 云台模态测试点

Fig.12 Modal experiment point of pan-tilt

图 13 为云台模态试验的结果,谐振峰值处的频率相位为 90° ,为有效模态频率。测试结果显示云台一阶模态频率为 64 Hz,与云台机械系统优化后的一阶模态频率相差 13.4%,误差在合理范围内,验证了云台机电系统优化的正确性和合理性。

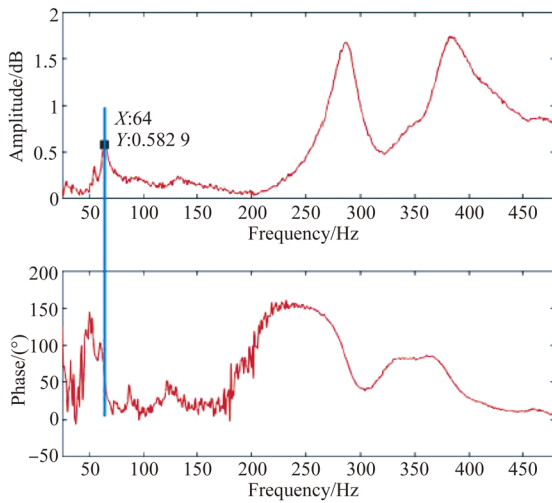


图 13 模态实验结果

Fig. 13 Results by modal experiment

7 结 论

本文针对多旋翼无人机云台系统轻质量和快

响应的设计要求,提出一种机电多目标优化方法,在考虑机电耦合作用的条件下,同时优化了云台的结构系统和控制系统。结构优化中,针对复杂仿真模型优化效率低的问题,采用近似模型结合多目标遗传算法的优化方法;控制优化中,基于结构优化后的仿真模态参数和带宽设计要求,进行多目标优化。

最终得到了云台系统参数的最优设计点。相比于基于经验的初始设计点,最优化设计点使云台的质量降低了 8.8%,IAE 型积分误差降低了 54.8%,调节时间降低了 81.9%,上升时间降低了 53.4%。减小了飞行载体的载重,提高了云台控制系统的动静态性能。该优化流程从云台系统总体的角度,明显提升了云台的性能。最后通过模态实验测得云台一阶模态频率为 64 Hz,实验结果与优化结果相差 13.4%,在合理范围内,验证了优化仿真方法的正确性和合理性。

参考文献:

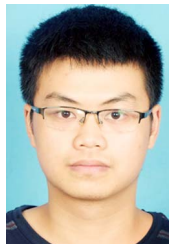
- [1] 毕凯,李英成,丁晓波,等. 轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势 [J]. 测绘通报, 2015(3): 27-31,48.
BI K, LI Y CH, DING X B, *et al.*. Aerial photogrammetric technology of light small UAV: status and trend of development [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(3): 27-31,48. (in Chinese)
- [2] ZHOU X, LI L, JIA Y, *et al.*. Adaptive fuzzy / proportion integration differentiation (PID) compound control for unbalance torque disturbance rejection of aerial inertially stabilized platform [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016, 13(5): 172988141666452.
- [3] 曾德林,肖凯,林竹翀,等. 航空遥感惯性稳定平台 LuGre 摩擦参数的分步辨识 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1148-1158.
ZENG D L, XIAO K, LIN ZH CH. Sub-step identification of LuGre friction parameters of inertially stabilized platform for airborne remote sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1148-1158. (in Chinese)
- [4] ZHOU X, JIA Y, ZHAO Q, *et al.*. Dual-rate-loop control based on disturbance observer of angular acceleration for a three-axis aerial inertially stabilized platform [J]. *ISA Trans*, 2016, 63: 288-298.
- [5] 誉斌,曹建斌,钱森. 混合驱动柔索并联机器人系统集成设计 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(21): 28-35.
ZI B, CAO J B, QIAN S. Integrated design of Hybrid-driven-based cable parallel manipulator system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(21): 28-35. (in Chinese)
- [6] 李琳,刘学. 压电结构系统机电耦合的强化与多阶共振抑制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(8): 1011-1016.
LI L, LIU X. Enhancement of electromechanical coupling for piezoelectric system and suppression of multimode vibration [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(8): 1011-1016. (in Chinese)
- [7] 孔民秀,陈琳,杜志江,等. 基于 NSGA-II 算法的平面并联机构动态性能多目标优化 [J]. 机器人, 2010, 32(2): 271-277.
KONG M X, CHEN L, DU ZH J, *et al.*. Multi-objective optimization on dynamic performance for a planar parallel mechanism with NSGA-II algorithm [J]. *Robot*, 2010, 32(2): 271-277. (in Chinese)
- [8] 于海莲,王永泉,陈花玲,等. 响应面模型与多目标遗传算法相结合的机床立柱参数优化 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11): 80-85.
YU H L, WANG Y Q, CHEN H L, *et al.*. Opti-

- mization for machine tool column combinling response surface model with Multi-Objective genetic algorithm [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(11): 80-85. (in Chinese)
- [9] 张继文,刘莉,李昌硕. 仿人机器人全方位步行参数的代理模型优化 [J]. *机器人*, 2016, 38(1): 56-63.
ZHANG J W, LIU L, LI CH SH. Surrogate model based optimization for omni-directional Walking parameters of humanoids [J]. *Robot*, 2016, 38(1): 56-63. (in Chinese)
- [10] 李沛峰,张彬乾,陈迎春. 基于响应面和遗传算法的翼型优化设计方法研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2012, 30(3): 395-401.
LI P F, ZHANG B Q, CHEN Y CH. Reaserch optimization method of wing shape based on response model and genetic algrothmn [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2012, 30(3): 395-401. (in Chinese)
- [11] 张彬乾,罗烈,陈真利,等. 飞翼布局隐身翼型优化设计研究 [J]. *航空学报*, 2014, 35(4): 957-967.
ZHANG B Q, LUO L, CHEN ZH L, *et al.*. Reaserch optimization design of wing shape aiming at layout [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(4): 957-967. (in Chinese)
- [12] 庞鸿锋,罗飞路,陈棣湘,等. 磁力仪温度误差的径向基神经网络补偿模型 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(3): 695-700.
PANG H F, LUO F L, CHEN L X, *et al.*. Temperature compensation model of fluxgate magnetometers based on RBF neural network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3): 695-700. (in Chinese)
- [13] 武星,楼佩煌,唐敦兵. 基于精英进化导向的多目标 PID 参数优化 [J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(9): 1235-1239.
WU X, LOU P H, TANG D B. Multi-objective optimization for PID parameter based on elitist-evolution guidance [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(9): 1235-1239. (in Chinese)

作者简介:



周向阳(1971—),男,河南洛阳人,博士,研究员,2008年于西安交通大学获得博士学位,主要从事机电一体化技术、惯性稳定平台设计与应用、微机电系统技术的研究。E-mail: xyzhou@buaa.edu.cn



朱 军(1993—),男,河北人,硕士,2015年于西安交通大学获得学士学位,2018年于北京航空航天大学获得硕士学位。主要从事惯性稳定平台系统结构设计与控制的研究。E-mail: zhujunz@buaa.edu.cn



时延君(1994—),女,硕士研究生,山东潍坊人,2017年于北京工业大学获得学士学位,主要从事惯性稳定平台系统结构设计与控制的研究。E-mail: shiyanjun@buaa.edu.cn