

长航时轻型固定翼农用遥感无人机设计与仿真

朱航^{1,2} 王月¹ 兰玉彬³ 张萃¹ 李珂宇¹

(1. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130025; 2. 数控装备可靠性教育部重点实验室, 长春 130025;
3. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642)

摘要: 针对电动无人机应用于农业遥感监测时受其续航时间限制的问题, 从实际应用角度出发, 设计了一种续航时间长、适用于农业遥感监测的翼身融合布局的轻型电动固定翼无人机。提出了翼身融合布局轻型固定翼无人机的总体设计方法, 确定了轻型固定翼无人机的结构参数, 建立了物理模型并对其参数进行了优化分析。通过计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 分析计算了翼身融合布局轻型固定翼无人机的气动性能, 基于流固耦合模型动态分析了其飞行状态下的受力分布。结果表明, 优化模型较初始设计模型的升阻比提高了 2.6%, 在迎角为 6°、巡航速度为 15.5 m/s 时, 所设计的翼身融合布局轻型固定翼无人机机身压力分布合理, 且具有良好的气动特性。起飞质量为 1.5 kg 时, 无人机下表面压力最大, 为 143 Pa, 升力主要集中在机翼前缘部分, 计算所得理论续航时间为 65 min, 在巡航阶段最大变形量 0.288 38 mm, 符合飞行器工作条件, 无人机结构和选用材料均满足设计和使用要求。本文设计的电动轻型固定翼农用遥感无人机在结构、材料和性能方面均适用于农业遥感监测。

关键词: 农用遥感无人机; 翼身融合布局; 长航时; 气动优化; 流固耦合; 计算流体力学

中图分类号: S251

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)03-0234-09

OSID:



Design and Simulation of Long-endurance and Light Agricultural Remote Sensing Fixed-wing UAV

ZHU Hang^{1,2} WANG Yue¹ LAN Yubin³ ZHANG Cui¹ LI Keyu¹

(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Key Laboratory of CNC Equipment Reliability, Ministry of Education, Changchun 130025, China

3. National Center for International Collaboration Research on

Precision Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The application of electric unmanned aerial vehicles (UAVs) in agricultural remote sensing monitoring is limited by their short endurance. A long-endurance battery-powered light blended-wing-body UAV was designed for agricultural remote sensing. A design method for a light blended-wing-body UAV was proposed. The structural parameters of the light fixed-wing UAV was optimized and a model was built. The aero-dynamic performance of the UAV was determined by computational fluid dynamics (CFD), and the force distribution in flight state was dynamically analyzed based on fluid-structure interaction model. The results showed that the lift-to-drag ratio of the optimized model was 2.6% higher than that of the initially designed model, and the light blended-wing-body UAV had good aerodynamic characteristics. The pressure distribution of the UAV was effective at a 6° angle of attack and a cruising speed of 15.5 m/s. When the take-off weight was 1.5 kg, the maximum value of pressure on the lower surface of the UAV was 143 Pa, and the lift force was mainly concentrated on the leading edge of the wing. The theoretical endurance time was 65 min, and the maximum stress during the cruising phase was lower than the tensile strength of the fuselage material and the yield strength of the rotor. Under the same conditions, the maximum value of total deformation was 0.288 38 mm. The above parameters all met the normal working conditions of the UAV. Therefore, the structure, materials, and performance of the proposed light agricultural remote sensing UAV were suitable for agricultural remote sensing. It also provided a design method and key technologies for the application of electric drones.

Key words: agricultural remote sensing UAV; blended-wing-body; long-endurance; aerodynamic optimization; fluid-structure interaction; computational fluid dynamics

收稿日期: 2020-11-21 修回日期: 2021-01-06

基金项目: 吉林省重点研发计划项目(20200401113GX)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(1012019204)

作者简介: 朱航(1981—),女,副教授,博士,主要从事无人机智能控制在精准农业中的应用研究, E-mail: hangzhu@jlu.edu.cn

0 引言

我国是农业大国,无人机遥感技术在农业监测中发挥了至关重要的作用^[1]。遥感技术受分辨率、时间周期、地理、空域和气象条件等限制,作业成本高,在农业监测中具有很大的局限性^[2-3]。采用小型无人机遥感信息平台获取信息,具有运行成本低、灵活性高以及获取数据实时快速等特点,是目前监测、快速获取农田信息的主要方法之一^[4-6]。

小型无人机包括小型固定翼无人机、直升机和总质量在5 kg以下的多旋翼无人机^[7]。无人机多采用电力驱动,也有少数无人机采用油动的方式^[8]。相比于油动无人机,电动无人机体积小、成本较低、场地适应能力强,是遥感无人机发展的主流方向。

近年来,国外对农用遥感无人机的研究较多。德国MikroKopter公司开发的OktoKopter XL型电动八旋翼无人机可搭载2.5 kg光学载荷,续航时间最长可达到30 min^[9]。Draganfly创新公司开发的Draganflyer X6型电动三轴六旋翼无人机的自身质量为1 kg,最大负载可达500 g,续航时间20 min^[10]。瑞士SenseFly公司开发的EBEE型电动固定翼无人机采用翼身融合式布局,起飞质量700 g,续航时间可达到50 min^[11]。美国ReadyMadeRC公司开发的Anaconda型电动固定翼无人机采用双尾撑V型尾翼的构型,最大负载4 kg,续航时间最长可达到45 min^[12]。德国MAVinci公司开发的Sirius I型电动固定翼无人机采用常规式布局,自身质量2.3 kg,最大负载550 g,并巡航飞行40 min^[13]。在国内,深圳大疆科技创新公司开发的Spreading Wing S1000+型电动八旋翼无人机有效载荷可达3 kg,续航时间为15 min^[14]。张立元^[15]设计的六旋翼电动无人机起飞质量4.5 kg,综合飞行时间可达19.2 min。杨贵军等^[16]利用多旋翼无人机平台监测小麦育种信息,无人机有效载荷3.5 kg,续航时间15 min。尽管国内外研究者对小型遥感无人机进行了大量研究,但是载荷能力和续航时间等问题仍是小型电动遥感无人机目前急需解决的重点问题^[17-19]。

国内目前对固定翼遥感无人机的研究还较少。相比于多旋翼无人机,固定翼无人机拥有更长的续航时间、更强的载荷能力和更优的飞行效率^[20],可以大大提高作业效率,节省时间成本。固定翼无人机气动布局影响其升阻比,进而影响无人机续航时间^[21-22],翼身融合布局结构的固定翼无人机的升阻比高、整体质量小,续航时间更长^[23],非常适合应用于农业遥感监测和军事侦察等领域。

为了解决电动无人机续航时间短的问题,本文结合农业遥感监测需求,设计一款翼身融合布局的电动轻型固定翼无人机,提出一种电动轻型固定翼无人机设计方法,并优化设计参数、分析仿真结果,旨在突破电动轻型固定翼无人机载荷与动力系统最优匹配和飞行稳定性等技术难点,为电动固定翼遥感无人机在农业领域的应用提供理论和技术支撑。

1 总体设计

根据农业遥感监测需求,电动轻型固定翼遥感无人机主要设计目标为:翼展小于1 m,采用电力驱动,搭载RedEdge-MX型多光谱相机,质量232 g,工作高度120 m时地物分辨率为8 cm,续航时间60 min,采用手抛式起飞,滑翔降落。

1.1 设计参数确定

1.1.1 起飞质量

质量分析是无人机性能分析的基础,无人机起飞质量计算式为^[24]

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \quad (1)$$

式中 W_T ——飞机起飞质量

W_1 ——结构质量

W_2 ——动力装置质量

W_3 ——电池质量

W_4 ——机载电子与任务设备质量

机身材料使用EPP泡沫(发泡聚丙烯),EPP材料密度小、抗震抗压、耐腐蚀性强,非常适合用作轻型固定翼无人机机体的材料,密度为31 kg/m³,无人机体积为0.005 m³,得到结构质量 W_1 为0.2 kg。动力装置使用朗宇2212 KV2450型无刷电机,质量57 g,使用40 A电子调速器,质量39 g,桨叶使用6040桨,舵机质量为12 g,包括舵机拉杆等结构, W_2 定为0.2 kg。电池选用锂聚合物电池(3S,11.1 V),容量为3 300 mA·h的锂电池, W_3 为0.3 kg。机载电子与任务设备包括飞控和摄像头等, W_4 为0.8 kg。整机起飞质量 W_T 定为1.5 kg。

1.1.2 整机参考面积与翼载荷

对于普通固定翼无人机,翼载荷(飞机质量 W 除以整机参考面积 S)一般为35~100 g/dm²^[25],经过计算,满足起飞质量的参考面积为0.15~0.43 m²。本文参考面积选用除翼尖小翼外的全部投影面积,整机参考面积确定为0.22 m²,翼载荷为68 g/dm²。

1.1.3 整机展弦比

较大的展弦比能降低翼尖涡产生的诱导阻力,增加升力曲线斜率,延长续航时间,但是过大的展弦比也会增加机翼的质量,增大弯矩,导致机翼变形,较小的展弦比使得结构紧凑,展弦比计算式为

$$\lambda = \frac{l}{b} = \frac{l^2}{S} \quad (2)$$

式中 b ——机翼平均几何弦长

l ——机翼展长

整机参考面积为 0.22 m^2 , 根据设计要求翼展长确定为 0.9 m , 展弦比 $\lambda = 3.68$ 。

1.1.4 其他参数

对于低速飞机, 后掠角可调节飞机重心位置以及改善飞机稳定性。初定前缘后掠角为 30° , 后缘后掠角为 17° 。翼尖小翼采用上小翼的形式。机翼扭转一定角度可以防止大攻角下的翼尖失速, 改善机翼上的升力分布与巡航特性, 为了简化制造工艺, 取 0° 扭转。机翼安装角和上反角参考闵山山^[26] 所设计的翼身融合布局无人机, 选取为 0° 。

1.2 几何模型建立

根据设计参数, 将无人机平面形状划分为 4 个部件, 分别为机身、内翼、外翼和翼尖小翼, 外翼上设有副翼, 如图 1 所示。利用三维建模软件 CATIA, 根据以上设计的各个参数建立无人机几何模型, 如图 2 所示, 整个模型长 900 mm , 宽 520 mm , 高 110 mm 。

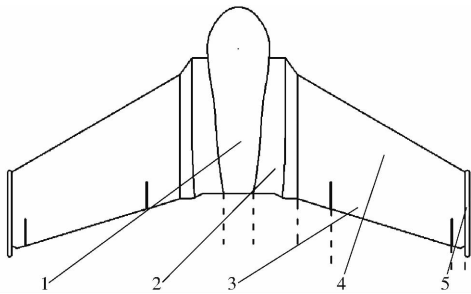


图 1 无人机平面形状划分示意图

Fig.1 Division of UAV's plane shape

1. 机身 2. 内翼 3. 副翼 4. 外翼 5. 小翼

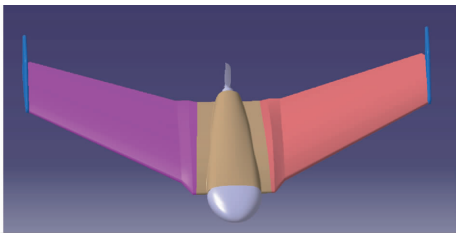


图 2 几何模型

Fig.2 Geometric model

1.3 飞行控制系统设计

飞行控制系统在无人机系统中起着关键作用, 相当于无人机的大脑, 进行决策和控制。飞行控制系统主要包括: 主控制器、位姿估计模块、动力模块、通信模块和电源模块, 结构框架如图 3 所示。本研究采用的动力模块包括 1 个电机和 2 个舵机, 电机给尾部螺旋桨提供动力, 2 个舵机分别控制左右副翼, 实现滚转和俯仰运动。电机输出巡航阶段螺旋

桨所需转速, 用于更精确的 CFD 仿真。

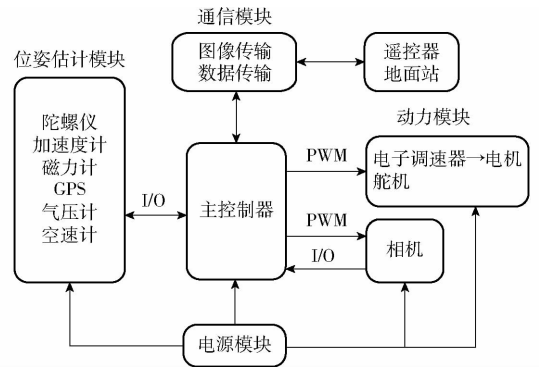


图 3 飞行控制系统结构框图

Fig.3 System block diagram

2 仿真计算

针对无人机的气动外形, 基于 ANSYS 15.0 软件中 Fluent 模块利用 CFD 计算其气动特性, 通过 ANSYS 15.0 软件中的流固耦合模块分析其受应力、应变情况。

2.1 CFD 仿真

2.1.1 三维网格划分

划分网格的目的是将流场区域离散化, 将实际流场的物理域转换为形状便于计算的计算域, 网格划分占据 CFD 周期 $60\% \sim 80\%$ 的时间, 并且计算结果的精度和网格质量密切相关^[27]。本文选取的计算域如图 4 所示, 采用非结构网格, 创建的网格数量为 210 万, 内流域中旋转域单元尺寸采用 $4 \times 10^{-3} \text{ m}$, 无人机表面边界层第 1 层厚度取 $2 \times 10^{-5} \text{ m}$, 内流域尺寸最小为 $2 \times 10^{-3} \text{ m}$, 外流域尺寸最小为 0.1 m , 增长率采用 1.1, 无人机划分的网格如图 5 所示。

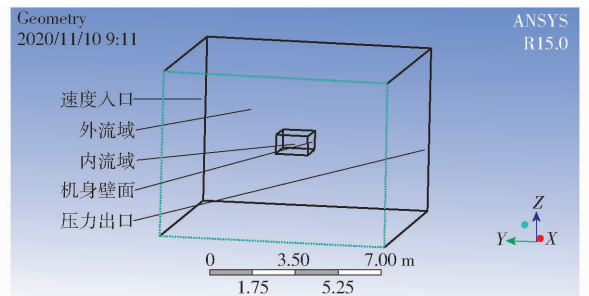


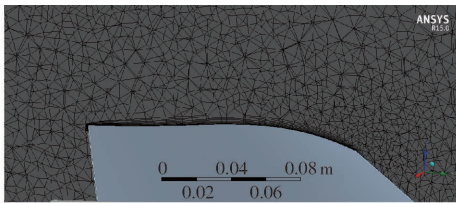
图 4 流体仿真的计算域划分

Fig.4 Computational domain used in flow simulation

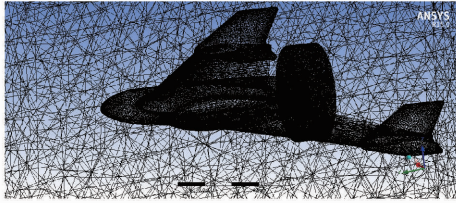
划分的网格倾斜度为 0.23, 正交质量为 0.85, 网格倾斜度在 $0 \sim 0.25$ 之间, 正交质量在 $0.7 \sim 0.95$ 之间, 表示网格质量良好。

2.1.2 边界条件和参数设置

对外流场进行数值模拟仿真时, 利用有限体积法求解 N-S 方程计算空气动力学^[28], 在稳态计算模式下, 选择 SST $k-\omega$ 湍流模型^[29-30] 作为流体区



(a) 机体表面边界层



(b) 机身与桨叶旋转域网格

图5 机体表面网格

Fig. 5 Surface mesh of UAV

域模型,其运输方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

式中 k ——湍动能 ω ——比耗散率

ρ ——空气密度

i, j ——三维空间的自由度,取1、2、3

G_k ——湍流动能

G_ω ——比耗散生成项

D_ω ——正交发散项

Γ_k, Γ_ω ——扩散率

S_k, S_ω ——用户自定义的源项

u_i ——流体流动速度

Y_k, Y_ω ——发散项

由于在标准大气压和正常温度下的空气密度变化量小于5%,并且空速不大,远小于0.3Ma,故将其视作不可压缩气体,并且考虑空气重力,选用基于压力的求解器类型,材料选用不可压缩气体,空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$,大气压为101.325 kPa,空气粘性系数 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,温度为288.15 K。入口选用速度入口,速度为30 m/s,出口选用压力出口,上下面和飞机表面选用无滑移壁面,雷诺数 Re 约为 4×10^5 ,桨叶旋转体的转速定为满足巡航要求时的10 000 r/min。求解算法为收敛速度快的SIMPLEC算法,根据无人机飞行过程中迎角的变化,计算迎角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 中的11个工况。

2.2 流固耦合

流固耦合分为直接耦合、单向流固耦合和双向流固耦合^[31]。单向流固耦合过程简单,稳态求解快,单向流固耦合应力比双向流固耦合大,运算速度

快,也更偏于设计安全^[32],本文采用基于ANSYS的单向流固耦合。

2.2.1 材料加载及网格划分

机体材料选用EPP泡沫,螺旋桨材料选用ABS塑料,EPP^[33]和ABS^[34]材料特性如表1所示,在Engineering Data中定义参数后,加载到机体上。利用四面体网格划分方法划分网格,网格数量接近13万。

表1 材料特性参数

Tab.1 Material properties

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/Pa	泊松比
EPP	31	8.96×10^8	0.41
ABS	1.05×10^3	2.00×10^9	0.40

2.2.2 CFD数据导入

流固耦合面的数据通过压力数据的形式导入静力学分析,如图6所示,尾部设定为固定面,计算在此气动条件下的结构应力和变形量。

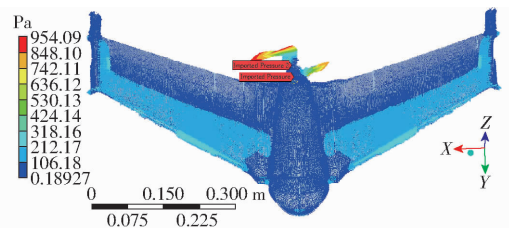


图6 压力数据导入结果

Fig. 6 Imported pressure data

3 结果与分析

3.1 数值分析与参数优化

3.1.1 模型优化

在展弦比、梢根比等参数确定的情况下,在初始模型的基础上,对无人机机身的后掠角和翼尖小翼的类型进行改进,得到相对优化的模型,提高升阻比,提升续航性能,并得到后掠角与翼尖小翼类型对无人机气动性能的影响。

目前已有的农用电动飞翼无人机一般采用中等后掠角^[29],结合本研究采用的初始结构,后掠角范围定为 $25^\circ \sim 40^\circ$ 。翼尖小翼能改善机身受到的诱导阻力,一般有上小翼、下小翼和翼梢端板3种形式。故后掠角与小翼类型各选用4个水平,如表2所示,利用CFD仿真进行16次的全面试验。

3.1.2 参数优化结果分析

通过改变后掠角和翼尖小翼类型,阻力系数、升力系数和升阻比试验结果如图7~9所示。

如图7所示,阻力系数随着后掠角的升高大致呈下降趋势,后掠角的增大对减小飞行过程中产生

表2 因素水平
Tab.2 Factors and levels

水平	因素	
	后掠角/(°)	小翼类型
1	25	无小翼
2	30	上小翼
3	35	下小翼
4	40	翼梢端板

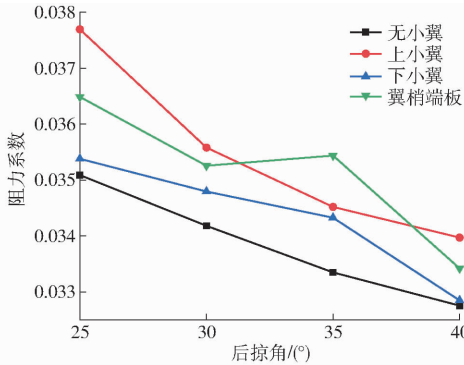


图7 阻力系数试验结果

Fig.7 Test result of drag coefficient

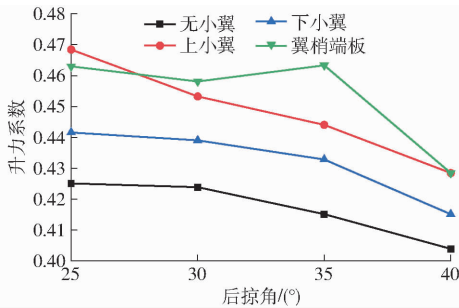


图8 升力系数试验结果

Fig.8 Test result of lift coefficient

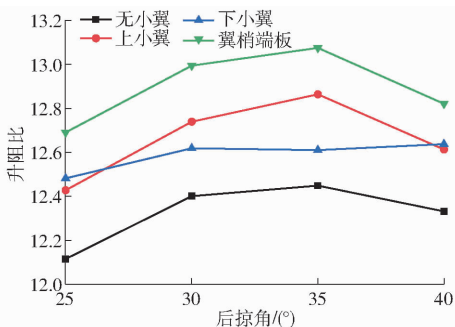


图9 升阻比试验结果

Fig.9 Test result of lift-to-drag ratio

的阻力有一定的作用。后掠角一定时,无小翼类型的阻力系数最小,上小翼的阻力系数最大。翼尖小翼结构的加入,会略微增大飞行过程中产生的阻力。

如图8所示,升力系数随着后掠角的增大基本呈下降趋势,后掠角的增大使得无人机在飞行过程中产生的升力减小。后掠角一定时,无小翼类型的升力系数最小,后掠角在30°~40°之间时,翼梢端

板类型的升力系数最大。翼尖小翼结构的加入,会降低飞行过程中产生的诱导阻力,提高无人机的升力。

如图9所示,无人机的升阻比随着后掠角的增大先升高后降低,并在35°时达到最大值。后掠角一定时,无小翼类型的升阻比最小,翼梢端板类型的升阻比最大。可以看出,采用翼尖小翼尽管会增大一部分阻力系数,但对增大整机的升阻比贡献很大。

3.1.3 最优模型

由全面试验的结果得出,后掠角为35°,采用翼梢端板类型的无人机升阻比最大。采用此结果作为优化后的模型,升阻比较初始模型提升了2.6%。优化后的模型如图10所示。

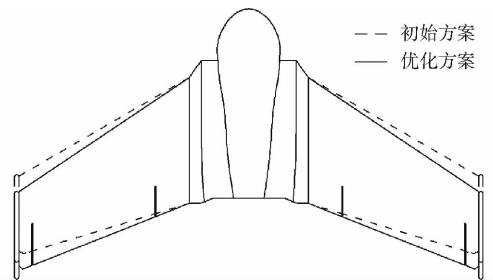


图10 优化方案与初始方案对比

Fig.10 Comparison between optimized design and initial design

3.2 气动特性

3.2.1 巡航时长

选用最优模型,改变迎角,设计的翼身融合布局无人机气动性能结果如图11~13所示。

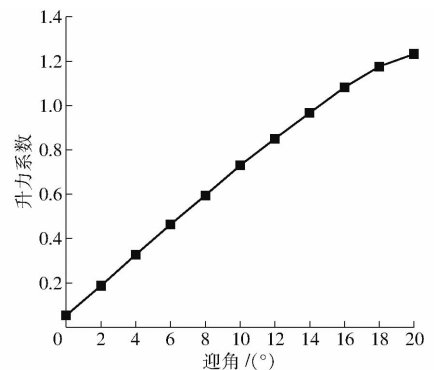


图11 升力系数变化曲线

Fig.11 Lift coefficient curves

如图11所示,升力系数随迎角增大而增大,在0°~16°升力系数近似线性变化,之后斜率越来越小,在迎角为0°时升力系数最小,为0.054,在迎角为20°时升力系数最大,为1.24,并且在20°时斜率趋于0,此时已经接近失速迎角。在小于16°均可作为巡航迎角。

飞机在飞行过程中,阻力来自摩擦阻力、诱导阻

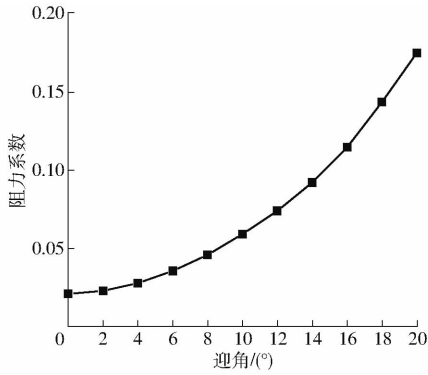


图 12 阻力系数变化曲线

Fig. 12 Drag coefficient curves

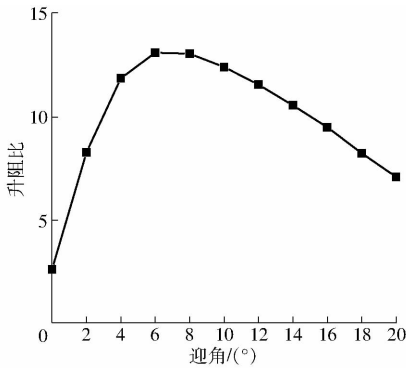


图 13 升阻比变化曲线

Fig. 13 Lift-to-drag ratio curves

力和压差阻力,通常 CFD 软件计算所得阻力系数较真实值偏大^[35]。由图 12 可知,阻力系数随迎角的增大而升高,且斜率越来越大,在迎角为 0°时阻力系数最小,为 0.02,在迎角为 20°时阻力系数已达到 0.175。无人机机翼的阻力系数在小迎角时起主导作用的是摩擦阻力,小迎角下压差阻力变化不大,在大迎角时,压差阻力与诱导阻力迅速增大,成为主导因素,使得阻力曲线的斜率越来越大。

如图 13 所示,随着迎角的增大,升阻比先增大再减小,在迎角 6°~8°之间,升阻比最大,在迎角为 6°时,升阻比为 13。

无人机工作时,电池大部分能量用于巡航状态,在巡航状态无人机续航时间与升阻比有关,升阻比越大,续航时间越长,巡航范围也会提高。近似取迎角 6°时为巡航迎角,在巡航时力平衡方程满足^[26]

$$\begin{cases} G = L + T \sin \alpha \\ D = T \cos \alpha \\ L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \\ D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D \end{cases} \quad (5)$$

式中 G ——机体重力 α ——迎角

L ——升力 D ——阻力

T ——电机推力 v ——巡航速度

C_L ——升力系数 C_D ——阻力系数

由式(5)可得无人机在迎角为 6°时的巡航速度为 15.5 m/s。对于电动无人机,其续航时间计算式为^[36]

$$t = \frac{Q_{dc} \eta_m \eta_{prop} \eta_e}{g v W_T} \frac{L}{D} \quad (6)$$

式中 Q_{dc} ——电池储存能量

η_m ——巡航状态电机效率

η_{prop} ——螺旋桨效率

η_e ——电子调速器效率

g ——重力加速度

本研究动力系统所选取的电池电压为 11.1 V, 3 300 mA·h 锂电池,电机效率 η_m 为 0.8,螺旋桨效率 η_{prop} 为 0.7,电子调速器效率 η_e 为 0.95。因此,计算得到在此巡航状态下无人机飞行时间 t 为 65 min,满足长航时设计要求。

3.2.2 巡航状态气动特性分析

在迎角为 6°、空速为 15.5 m/s(巡航状态)条件下,无人机上下表面压力云图如图 14 所示,显示的压力范围为机身的压力范围。

由图 14 可知,无人机整体压力分布合理,压力最大值在机翼的前缘部分,为 143 Pa,下表面压力普遍大于上表面,从而形成升力。同时上表面压力最小处在机翼前缘部分,上下压差的较大值也普遍集中在机翼前缘部分,说明升力主要来自于机翼前半段,后半段对升力贡献较小,符合一般规律。沿翼展方向截取对称面 100、200、280、350、420 mm 处的翼剖面,测量 5 个部分机体表面的压力系数分布,图 15 为初始模型和优化模型这 5 个部分机体表面压力系数分布图。

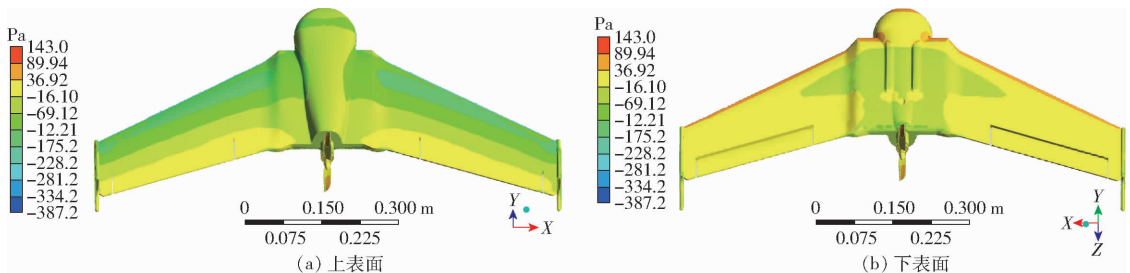


图 14 无人机上下表面压力云图

Fig. 14 Pressure contours on upper and lower surface of UAV

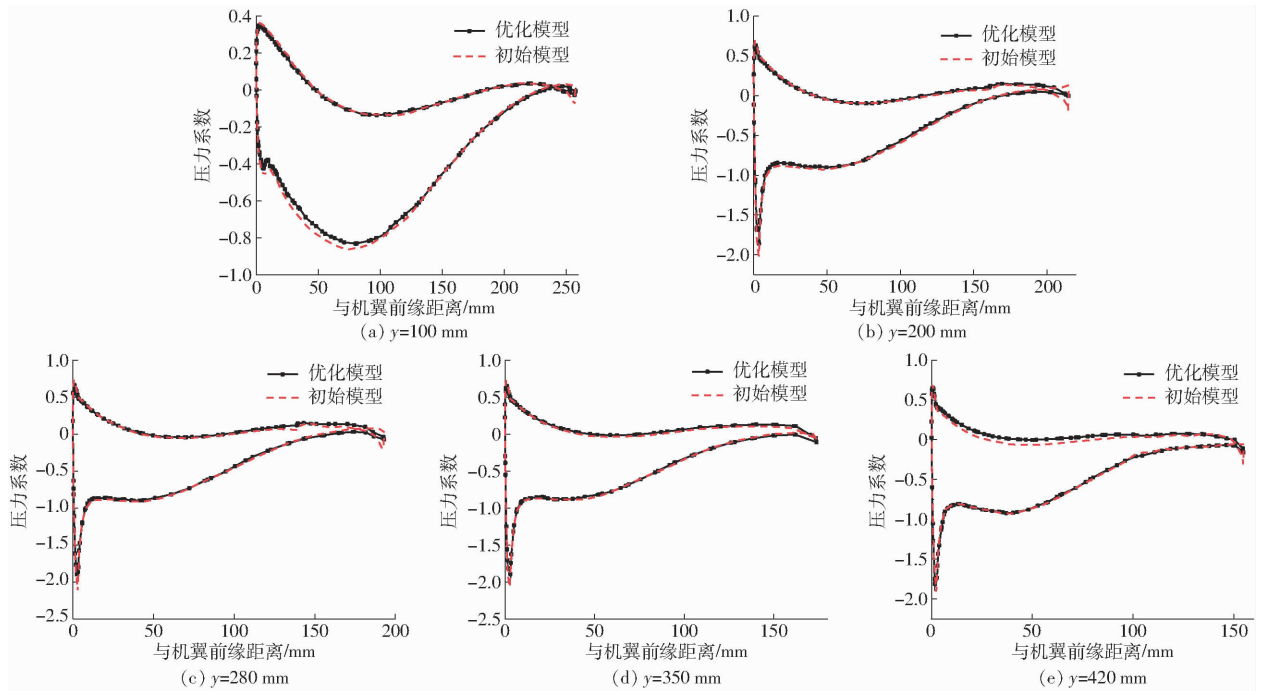


图 15 不同展向位置处初始模型和优化模型的机体表面压力系数分布比较

Fig. 15 Comparison of surface pressure coefficient of UAV at different span-wise locations between initial model and optimized model

如图 15 所示,机翼下表面压力系数基本大于上表面压力系数,并且在机翼前缘部分上下表面的压力系数差值大于后缘部分,说明升力主要集中在机翼前缘部分。 $y = 100 \text{ mm}$ 处为内翼压力系数分布,其余部分为外翼压力系数分布,机身由于需要给机载电子与任务设备提供足够的空间,独特的气动外形也使得提供的升力较小,内翼和外翼提供了大部分升力。通过初始模型与优化模型的压力系数对比,靠近机身的部分压力分布近似相同,在靠近翼梢的部分,优化方案的压力系数分布优于初始方案。说明改进后掠角和翼尖小翼类型对固定翼的影响主要集中在翼梢部分。

3.3 受力变形

在迎角为 6° 、空速为 15.5 m/s (巡航状态) 条件下,通过单向流固耦合,得到的总变形量和应力如图 16 所示。

如图 16a 所示,总变形量基本分布在机翼上,越靠近翼梢总变形量越大,最大值为 0.28838 mm ,分布在翼梢的位置上,机身与桨叶的总变形量相对很小,总的来说,在巡航状态的气动载荷导致的总变形量很小,符合正常工作条件。由图 16b 可知,机身上的应力主要分布在机翼上,最大值分布在翼根处,为 0.08 MPa ,故无人机在巡航状态时,机翼承受了主要的升力,使得应力主要集中在机翼翼根的部分,EPP 材料在成型条件合适时,拉伸强度最大能达到 1.9 MPa ^[37],机身能承受在此巡航状态的气动载荷。桨叶上的应力能达到 6.2518 MPa ,远小于螺旋桨的

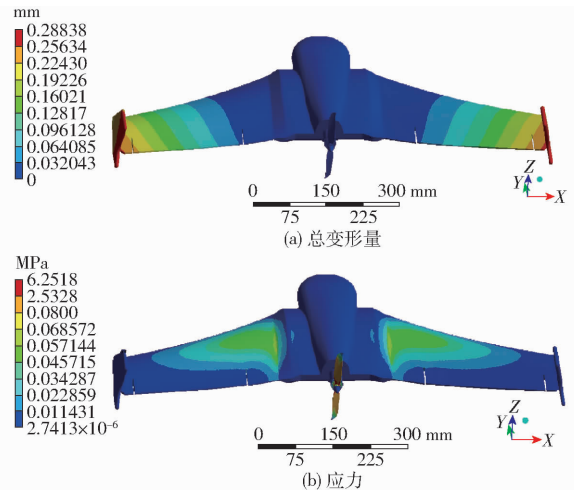


图 16 气动载荷下的总变形量和应力分布

Fig. 16 Total deformation and equivalent stress under aerodynamic loads

弯曲屈服强度 70 MPa ^[34]。该无人机结构的强度和刚度均满足设计和遥感领域使用要求。

4 结论

(1) 通过改进后掠角和翼尖小翼类型对初始模型进行参数优化,获得后掠角与翼尖小翼类型对整机阻力系数、升力系数和升阻比的影响规律,优化后升阻比提高了 2.6% 。

(2) 机体压力分布合理,机身下表面压力普遍大于上表面压力,升力主要集中在机翼前缘部分,在巡航阶段无人机机翼下表面压力最大,为 143 Pa 。

(3) 所设计的农用遥感无人机具有良好的气动

性能,升阻比最大可达13。在起飞质量为1.5 kg、迎角为 6° 、巡航速度为15.5 m/s时,数值分析计算所得续航时间为65 min,满足农业遥感监测中长航时、无人机载荷与动力系统最优匹配的设计要求。

(4)在巡航阶段,机身气动载荷下的应力最大

值为0.08 MPa,小于材料的拉伸强度1.9 MPa,桨叶上应力最大为6.251 8 MPa,远小于材料的屈服强度70 MPa,总变形量最大为0.288 38 mm,不会影响正常工作。在巡航阶段该无人机结构和选用的材料均能满足设计和使用要求。

参 考 文 献

- [1] 于文涛, 依兰, 尹忠辉. 浅议遥感技术在农业发展中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(9): 114-116.
YU Wentao, YI Lan, YIN Zhonghui. The application of remote sensing technology in development of agriculture[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(9): 114-116. (in Chinese)
- [2] 自由路, 金继运, 杨俐苹, 等. 低空遥感技术及其在精准农业中的应用[J]. 土壤肥料, 2004(1): 3-6, 52.
BAI Youlu, JIN Jiyuan, YANG Liping, et al. Technology of low altitude remote sensing and its applications in precision agriculture[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2004(1): 3-6, 52. (in Chinese)
- [3] 兰玉彬, 邓小玲, 曾国亮. 无人机农业遥感在农作物病虫害诊断应用研究进展[J]. 智慧农业, 2019, 1(2): 1-19.
LAN Yubin, DENG Xiaoling, ZENG Guoliang. Advances in diagnosis of crop diseases, pests and weeds by UAV remote sensing [J]. Smart Agriculture, 2019, 1(2): 1-19. (in Chinese)
- [4] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小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.
WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 1-12. (in Chinese)
- [5] 朱姜蓬, 岑海燕, 何立文, 等. 农情监测多旋翼无人机系统开发及性能评估[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 43-52.
ZHU Jiangpeng, CEN Haiyan, HE Liwen, et al. Development and performance evaluation of a multi-rotor unmanned aircraft system for agricultural monitoring[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 43-52. (in Chinese)
- [6] 王利民, 刘佳, 杨玲波, 等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 136-145.
WANG Limin, LIU Jia, YANG Lingbo, et al. Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 136-145. (in Chinese)
- [7] DARREN T, ARKO L, ZBYNEK M, et al. Spatial co-registration of ultra-high resolution visible, multispectral and thermal images acquired with a micro-UAV over Antarctic moss beds [J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 4003-4024.
- [8] MARINELLO F, PEZZUOLO A, CHIUMENTI A, et al. Technical analysis of unmanned aerial vehicles (drones) for agricultural applications[C]//Proceedings of the 15th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2016, 15: 870-875.
- [9] QUADRI S, SIDEK O, ABDULLAH A. A study of state estimation algorithms in an OktoKopter[J]. International Journal of u- and e-Service, Science and Technology, 2014, 7: 247-266.
- [10] HUNT E R, HIVELY W D, FUJIKAWA S J, et al. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring [J]. Remote Sensing, 2010, 2(1): 290-305.
- [11] CHIANUCCI F, DISPERATI L, GUZZI D, et al. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 47: 60-68.
- [12] SHI Yeyin, MURRAY S C, ROONEY W L, et al. Corn and sorghum phenotyping using a fixed-wing UAV-based remote sensing system[C]//Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping. SPIE Digital Library, 2016: 98660E.
- [13] DOLEIRE-OLTMANN S, MARZOLFF I, PETER K D, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco[J]. Remote Sensing, 2012, 4(11): 3390-3416.
- [14] 崔美娜. 基于无人机遥感的棉花螨害动态监测研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019: 9-10.
CUI Meina. Study on dynamic monitoring of cotton spider mites based on remote sensing of UAV [D]. Shihezi: Shihezi University, 2019: 9-10. (in Chinese)
- [15] 张立元. 多旋翼无人机多光谱遥感图像采集系统开发[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 14-19.
ZHANG Liyuan. Research on multi-rotors UAV multi-spectral image acquisition system [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017: 14-19. (in Chinese)
- [16] 杨贵军, 李长春, 于海洋, 等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 184-190.
YANG Guijun, LI Changchun, YU Haiyang, et al. UAV based multi-load remote sensing technologies for wheat breeding information acquirement[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 184-190. (in Chinese)
- [17] YANG Shulin, YANG Xiaobing, MO Jianyou. The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China [J]. Precision Agriculture, 2018, 19(2): 278-292.
- [18] 孙刚, 黄文江, 陈鹏飞, 等. 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 1-17.
SUN Gang, HUANG Wenjiang, CHEN Pengfei, et al. Advances in UAV-based multispectral remote sensing applications[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 1-17. <http://www.jcsam.org/jcsam/>

- ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180301&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.001. (in Chinese)
- [19] 刘忠, 万炜, 黄晋宇, 等. 基于无人机遥感的农作物长势关键参数反演研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 60-71.
LIU Zhong, WAN Wei, HUANG Jinyu, et al. Progress on key parameters inversion of crop growth based on unmanned aerial vehicle remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 60-71. (in Chinese)
- [20] 纪景纯, 赵原, 邹晓娟, 等. 无人机遥感在农田信息监测中的应用进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 773-784.
JI Jingchun, ZHAO Yuan, ZOU Xiaojuan, et al. Advancement in application of UAV remote sensing to monitoring of farmlands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 773-784. (in Chinese)
- [21] PANAGIOTOU P, KAPAROS P, YAKINTHOS K. Winglet design and optimization for a MALE UAV using CFD[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 39: 190-205.
- [22] CHUNG P H, MA D M, SHIAU J K. Design, manufacturing, and flight testing of an experimental flying wing UAV[J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9(15): 22.
- [23] 王豪杰, 李杰, 周洲. 飞翼类特殊布局无人机气动设计研究[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(5): 789-793.
WANG Haojie, LI Jie, ZHOU Zhou. Airfoil and wing layout design for a certain flying wing UAV [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(5): 789-793. (in Chinese)
- [24] 杨笑天. 森林防火小型无人机总体设计与仿真研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
YANG Xiaotian. Overall design and simulation research of small UAV for forest fire prevention [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [25] 朱宝鑫. 模型飞机飞行原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007: 452.
- [26] 闵山山. 某型无尾飞翼无人机气动布局设计与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 21-22.
MIN Shanshan. Aerodynamic configuration design and analysis of a certain tailless flying wing UAV [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015: 21-22. (in Chinese)
- [27] 安效民. 飞行器空气动力特性分析与计算方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012: 13-27.
- [28] SU Haoqin, BAO Xiaoxiang, LI Jianhua, et al. Calculation and analysis on stealth and aerodynamics characteristics of a medium altitude long endurance UAV[J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 111-115.
- [29] 师志强. 气动参数对农用电动飞翼无人机续航性能的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 23-24.
SHI Zhiqiang. The effect of aerodynamic parameters on endurance time of agricultural electric flying wing [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017: 23-24. (in Chinese)
- [30] 张磊. 某型飞翼式无人机气动优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 19-20.
ZHANG Lei. Research on aerodynamic optimization of a flying wing UAV [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 19-20. (in Chinese)
- [31] KIM C, LEE Y G. Multi-disciplinary design optimization of unmanned aerial vehicle [M]. New York: Amer. Soc. Mechanical Engineers, 2012: 445-448.
- [32] 邵学博. 基于 ANSYS 的机翼的流固耦合分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 35-56.
SHAO Xuebo. The fluid-solid interaction analysis of an airfoil based on ANSYS [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012: 35-56. (in Chinese)
- [33] 付秋莹. 基于 ANSYS Workbench 对玻璃杯包装的跌落分析[J]. 上海包装, 2018(6): 14-16.
FU Qiuying. Analysis of the drop of glass packaging based on ANSYS Workbench [J]. Shanghai Packaging, 2018(6): 14-16. (in Chinese)
- [34] 吴继斌, 郭勤涛, 王兴刚. 某小型无人机螺旋桨静强度分析[J]. 机械设计与制造, 2009(8): 193-194.
WU Jibin, GUO Qintao, WANG Xinggang. Static strength analysis for propeller of an unmanned aerial vehicle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(8): 193-194. (in Chinese)
- [35] 李权, 郭兆电, 邓一菊, 等. 运输类飞机巡航阻力 CFD 计算分析[J]. 航空工程进展, 2011, 2(4): 402-408.
LI Quan, GUO Zhaodian, DENG Yiju, et al. CFD analysis for transport's cruise drag prediction [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(4): 402-408. (in Chinese)
- [36] 刘伏虎, 马晓平. 小型电动无人机续航性能提升方法研究[J]. 飞行力学, 2010, 28(5): 13-15.
LIU Fuhu, MA Xiaoping. Research for improving the endurance performance of mini-type electric powered UAV [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(5): 13-15. (in Chinese)
- [37] 张雯, 林剑英, 王月香, 等. 一步法交联膜压发泡聚丙烯的力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(6): 118-121.
ZHANG Wen, LIN Jianying, WANG Yuexiang, et al. Mechanical performance of expanded polypropylene using one-step compression molding method [J]. Polymer Material Science and Engineering, 2011, 27(6): 118-121. (in Chinese)