



# 多旋翼植保无人机运动分析与结构设计

秦超彬, 崔迎涛, 张志, 张开飞, 李赫

(河南农业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**多旋翼植保无人机是近年来新兴的植保机械,其作业高效,作业成本低廉,适应性强,可跨区域作业并且极大地减少了作业过程中与农药的接触。多旋翼植保无人机施药技术逐渐成熟,机翼旋转的下洗气流有利于在施药过程中增加药液的穿透性,并且在作业过程中不会发生对作物的碾压情况,很适宜在夏大豆生长中后期进行病虫害防治作业。结合当前国内外植保喷雾技术研究现状,在基础机型的田间试验后,对植保无人机进行运动理论分析和药箱内部流体的仿真测试,提出一种稳定的植保无人机机架结构,并对重要零部件进行仿真分析。通过 SolidWorks Simulation 对零件进行仿真分析并优化模型,使机架平台结构变得更加稳定,设计出符合现代农业生产条件的多旋翼植保无人机。

**关键词:**多旋翼无人机;植保;夏大豆;控制效率模型;仿真分析

## Motion Analysis and Structure Design of Multi-rotor Planting UAVs

QIN Chao-bin, CUI Yin-tao, ZHANG Zhi, ZHANG Kai-fei, LI He

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Multi-rotor planting UAV is an plant protection machine emerged recent years. Its operation is highly efficient, its operating cost is low, and its adaptability is strong. It can work across regions and reduce the contact with pesticides during the operation. The multi-rotor planting UAV application technology matured gradually, and the wing downwash air flow is beneficial to increase the penetration of its spraying liquid during application. Multi-rotor planting UAVs will not be subject to crop crushing during operation, and it is very suitable for pest control operations during the latter stages of summer soybean growth. Combining the current research status of plant protection spray technology at home and abroad, after field trials of basic models, the theoretical analysis of plant protection UAVs and the simulation testing of the fluid inside the box were carried out, and a stable plant protection UAV rack structure was proposed. Through SolidWorks Simulation's simulation analysis of parts and optimization of the model, the structure of the rack platform has become more stable, and multi-rotor plant protection UAV that meet the modern agricultural production conditions has been designed.

**Keywords:** Multi-rotor UAVs; Plant protection; Summer soybean; Control efficiency model; Simulation analysis

农业是当今社会关注的热点问题,发达国家通过农业机械化、集约化生产提高农业劳动生产率。20 世纪末,发达国家在农业机械研究中获得很多进展,植保机械产品也变得大型和高效<sup>[1]</sup>。在农业植保方面,配套机械也早已实现了机械化,以美国、日本、德国等发达国家为代表,形成大型植保机械为主的防治体系,航空植保也应用广泛<sup>[2-3]</sup>。自 1991 年以来,仅在日本,就有 2 500 多台雅马哈遥控直升机用于农业,在日本 35% 的稻田中进行了虫害防治<sup>[4]</sup>。我国在当前还以小型背负式喷雾机为主,大型的植保机械还没有得到推广,车载式施药装备虽然喷洒效率高,但是对于大豆、水稻和玉米等作物

难以作业<sup>[5-9]</sup>。在大豆植保作业时,主要还以人工喷施为主,效率低且后期进地困难。农用飞机航空施药,具有作业速度快,喷洒效率高等特点<sup>[3]</sup>,并且克服了农业机械或人工无法进地作业的难题。

当前中国植保无人机以多旋翼机型为主,相比直升机而言具有机械结构简单、操作简易等优点<sup>[6]</sup>,预计未来几年内,多旋翼植保无人机仍会是农业航空植保的主力。随着航空喷施的应用,国内学者对无人机用于不同作物的作业参数选择和雾滴沉积效果进行了大量探索,植保无人机作业高度、速度和喷幅等因素都会影响作业效果<sup>[10-13]</sup>。另外,多旋翼风场对雾滴分布的影响成为研究的热点

收稿日期:2018-03-22

基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS-04-PS23)。

第一作者简介:秦超彬(1994-),男,硕士,主要从事无人机、智能农业装备研究。E-mail:henauchin@163.com。

通讯作者:李赫(1972-),男,博士,副教授,主要从事大豆田间管理机械研究。E-mail:chungbuk@163.com。

问题<sup>[14]</sup>,药箱在作业过程中的质量变化也引起学者的关注<sup>[14-15]</sup>,还有关于多旋翼植保无人机的整体设计<sup>[16]</sup>等。以上所述,并没有讨论植保无人机的结构设计问题,也没有对植保无人机进行运动理论分析和药箱内部流体的仿真测试。

黄淮海地区夏大豆在种植过程中面临最大的问题就是病虫害,该地区夏大豆枝叶部位常见的病害有大豆花叶病、大豆灰斑病、大豆褐纹病、大豆菌性斑点病、大豆霉菌病、大豆白腐病等<sup>[17]</sup>;夏大豆常见虫害有大豆食心虫、豆杆黑潜蝇、大豆蚜虫、甜菜叶蛾、蜗牛等。在夏大豆生长的中后期,病虫害的爆发尤其频繁,由于大豆植被较为茂密且各个地区种植农艺不尽相同,轮式植保机械难以进入田间进



图1 田间试验照片

Fig. 1 Field trials photos

在前期试验中,河南农业大学自主研发的2NH16-10型植保无人机在飞行高度1 m,飞行速度 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,喷雾压力0.4 MPa时,喷雾均匀性最好,当飞行高度为1 m,飞行速度为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,喷雾压力为0.6 MPa的时候穿透性最好<sup>[13]</sup>。但在试验中也发现了该机型存在一些问题。续航能力较弱,这是由于电机配置过多,共轴桨叶重叠耗损电池能源;药箱震荡使得飞行器在减速和横移时产生晃动,造成喷雾不均匀且容易使飞行器坠落(图1)。本研究通过对此机型的轴距理论计算和实验测试设置<sup>[18-19]</sup>在SolidWorks中进行建模仿真。同时将喷头设置在旋翼中心下方,使喷雾更均匀分布在风场中,跟随气流到达大豆冠层的中下层及叶片背部,从而达到更好的防治效果。

1 多旋翼飞行器运动分析

多旋翼飞行器通过改变机架上不同位置的电机转速来调整飞行器自身的姿态,利用相邻电机的不同转向来抵消同一方向上产生的扭矩如图2,多旋翼飞行器在空间里共有6种自由度的运动,即沿X、Y、Z轴向的线性运动和围绕轴向的旋转运动。线性运动分别为沿X轴前后运动、Y轴侧向运动、Z

行作业,同时人工打药方式效率低下,并且成本较高,大型农场病虫害的爆发,经常会造成大豆大面积减产和品质下降,农民损失严重。多旋翼植保无人机施药技术的逐渐成熟,其作业效率较高,价格低廉,并且其机翼旋转的下洗气流有利于在施药过程中增加其药液的穿透性,并且在作业过程中不会发生对作物碾压的情况,很适宜在夏大豆生长中后期进行病虫害防治作业。

夏大豆生长中后期植被较为茂密,其病害的多样性及虫害的多样性,要求在植保作业过程中不仅要使药液施撒均匀,并且要求药液要有良好的穿透性。

轴垂直运动;旋转运动则定义为横滚运动,俯仰运动,偏航运动。横滚运动是绕X轴的旋转运动;俯仰运动是绕Y轴的旋转运动;偏航运动绕Z轴的旋转运动。

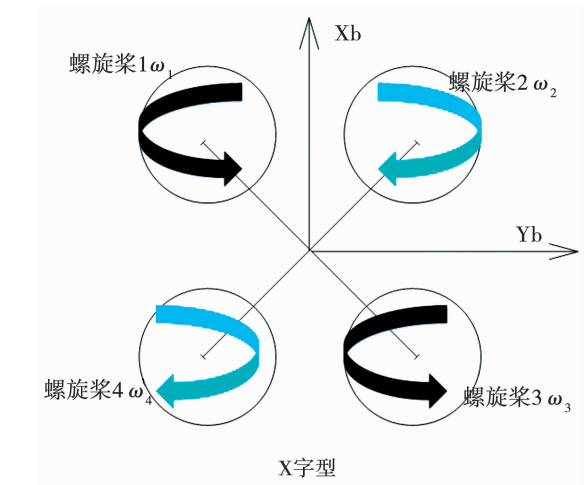


图2 多旋翼运动方式

Fig. 2 The way the multi-rotor moves

以Xb为多旋翼飞行器前进方向,在飞行器悬停时,4个电机转速相同, $\omega_1$ 为螺旋桨1角速度, $\omega_2$ 为螺旋桨2角速度, $\omega_3$ 为螺旋桨3角速度, $\omega_4$ 为螺旋桨4角速度,升力等于重力。

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 \tag{1}$$

横滚运动时,螺旋桨 1 和螺旋桨 4 转速相同。

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_4 \\ \omega_2 = \omega_3 \\ \omega_1 \neq \omega_2 \end{cases} \tag{2}$$

俯仰运动时,螺旋桨 1 和螺旋桨 2 转速相同,螺旋桨 1 大于或小于螺旋桨 3、4 的转速。

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_2 \\ \omega_4 = \omega_3 \\ \omega_1 \neq \omega_4 \end{cases} \tag{3}$$

偏航运动时,螺旋桨 1 和螺旋桨 3 转速相同,螺旋桨 1 大于或小于螺旋桨 2、4 的转速。

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_3 \\ \omega_2 = \omega_4 \\ \omega_1 \neq \omega_2 \end{cases} \tag{4}$$

经过基本运动分析,可以看出四旋翼飞行器为欠驱动模型,六旋翼或六旋翼以上的为多输入多输出模型。

桨叶的拉力模型为:

$$T = C_T \rho \left[ \frac{N \cdot 2\pi}{60} \right]^2 D_p^4 \tag{5}$$

$$\rho = \frac{273 P_a}{101325 (273 + T_t)} \rho_0 \tag{6}$$

$$P_a = 101325 \left( 1 - 0.0065 \frac{h}{273 + T_t} \right)^{5.2561} \tag{7}$$

式中:  $C_T$ —桨叶拉力系数;  $\rho$ —空气密度,  $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ;  $N$ —转速,  $\text{RPM}$ ;  $D_p^4$ —桨叶直径,  $\text{m}$ 。

$\rho_0$  为空气密度系数  $1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 桨叶的拉力逆模型即转速公式, 从式(5)可以得到

$$N = \frac{1}{4\pi^2} 60 \sqrt{\frac{T}{D_p^4 C_T \rho}} \tag{8}$$

联合桨叶拉力公式  $T = \frac{G}{n_r}$  可以得到转速的桨叶的拉力逆模型式:

$$N = \frac{1}{4\pi^2} 60 \sqrt{\frac{G}{n_r D_p^4 C_T \rho}} \tag{9}$$

转矩模型的一般公式为:

$$M = C_M \rho \left[ \frac{N \cdot 2\pi}{60} \right]^2 D_p^5 \tag{10}$$

式中:  $M$ —转矩,  $\text{Nm}$ ;  $C_M$ —桨叶转矩系数。

联合公式(8)可以推导出桨叶的转矩模型:

$$M = \frac{1}{4\pi^2} C_M \frac{G}{n_r C_T} D_p \tag{11}$$

多旋翼飞行器的机架布局主要根据飞行方向在机身的不同位置来区分, 可以分为十字型和 X 字型(图 2 和 3); 不同的旋翼个数和机身结构都会影

响到多旋翼的控制效率, 本文先以标准四旋翼做分析, 然后推导出六旋翼、八旋翼的控制效率模型。根据牛顿定律和推理, 可以简单地得到飞行器尺寸越大机动性越差这一线性关系, 关于尺寸关系本文不做讨论。

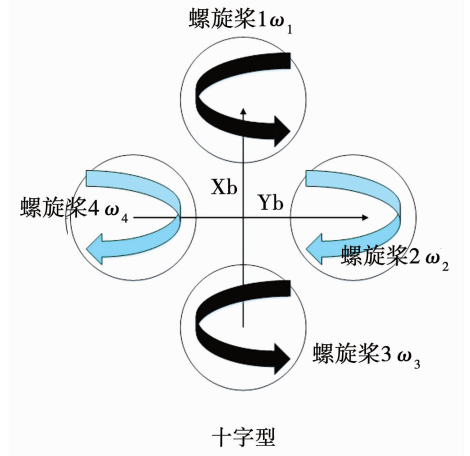


图 3 十字型四旋翼布局

Fig. 3 Arrangement of cross-shaped four-rotor

多旋翼飞行器在悬停的状态下单个桨叶的拉力可表示为:

$$T_i = C_T \omega_i^2 \tag{12}$$

其中,  $C_T$  为常数且可以由试验测得:

$$C_T = \frac{1}{4\pi^2} \rho D_p^4 \tag{13}$$

多旋翼飞行器在悬停的状态下单个桨叶在机架中产生的反扭矩为:

$$M_i = C_M \omega_i^2 \tag{14}$$

其中  $C_M$  常数且可以由试验测得:

$$C_M = \frac{1}{4\pi^2} \rho D_p^5 \tag{15}$$

在四旋翼中总拉力可表示为:

$$F = \sum_{i=1}^4 T_i = C_T (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \tag{16}$$

十字型四旋翼产生的力矩:

$$\begin{cases} \tau_x = dC_T (-\omega_1^2 + \omega_4^2) \\ \tau_y = dC_T (\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ \tau_z = dC_M (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \tag{17}$$

由公式(12)、(14)、(16)、(17)可以推导出十字型四旋翼总力矩的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} F \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T & C_T & C_T & C_T \\ 0 & -dC_T & 0 & dC_T \\ dC_T & 0 & -dC_T & 0 \\ C_M & -C_M & C_M & -C_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

对于 X 字型四旋翼, 总拉力与公式(16) 相同,

螺旋桨 1 与前进  $Xb$  方向夹角为  $45^\circ$ , 所以每个方向的力矩为:

$$\begin{cases} \tau_x = dC_T(\frac{\sqrt{2}}{2}\omega_1^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_2^2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_3^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_4^2) \\ \tau_y = dC_T(\frac{\sqrt{2}}{2}\omega_1^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_2^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_3^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_4^2) \\ \tau_z = dC_M(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (19)$$

由式(12)、(14)、(16)、(19)可以推导出 X 字型总力矩的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} F \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T & C_T & C_T & C_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2}dC_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dC_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dC_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dC_T \\ \frac{\sqrt{2}}{2}dC_T & \frac{\sqrt{2}}{2}dC_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dC_T & -\frac{\sqrt{2}}{2}dC_T \\ C_M & -C_M & C_M & -C_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

由矩阵公式(17)和(19)可以看出,同样是 4 个输入量,X 字型飞行器输出量比十字型要多,所以得出结论十字型布局的飞行器控制效率低于 X 字型飞行器,即 X 字型飞行器更为灵活,控制效率高。对于更多旋翼而言,我们假设奇数号的桨叶向左(逆时针)转动,偶数号向右(顺时针)转动,与前进方向的  $Xb$  轴夹角为  $\psi$ ,螺旋桨中心离机架中心的距离为  $d$ (图 4),那么可以得到多旋翼的控制效率模型如式(21)所示。

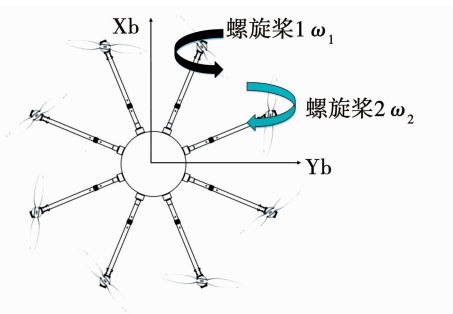


图 4 八旋翼 X 字型布局

Fig. 4 Eight-rotor X-shaped layout

$$\begin{bmatrix} F \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T & C_T & \cdots & C_T \\ -d_1 C_T \sin\psi_1 & -d_2 C_T \sin\psi_2 & \cdots & -d_{n_r} C_T \sin\psi_{n_r} \\ -d_1 C_T \cos\psi_1 & d_2 C_T \cos\psi_2 & \cdots & d_{n_r} C_T \cos\psi_{n_r} \\ C_M \delta_1 & C_M \delta_2 & \cdots & C_M \delta_{n_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \vdots \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中  $\delta_i = (-1)^{i+1}, i=1,2,3,4,\dots,n_r$

通过式(21)的多旋翼控制效率矩阵可以得到结论:桨叶个数越多,飞行器控制效率越高,即稳定性比桨叶个数少的好。

## 2 结构与建模仿真

设计目标为载重 10 L 的多旋翼植保无人机,无人机自重控制在 12 kg,总重为 22 kg,所以动力系统的最小推力需要大于 220 N。此机型由 8 个电机和旋翼提供动力,单个电机和旋翼产生的推力要达到 27.5 N,通过动力查询电机推力表,选用 5008 无刷电机和 1855 多旋翼桨叶,电机与桨叶性能表由河南大诚通用航空科技有限公司提供,未经实验室测试。

在设计植保无人机的飞行平台时,需要考虑到尺寸大小和桨叶个数对工作的影响。桨叶的安装也分为单桨和共轴双桨,双桨虽然不增加机身尺寸,但是单个桨叶的效率也会下降,共轴双桨的效率约等于 1.6 个单桨。由于植保无人机使用的时候要保持航向固定,对其机身灵活性要求不高,但在恶劣的工作环境中,稳定性要求高,还要简化结构复杂程度,所以首先确定选用八旋翼机架,安装单桨。桨叶间隙为桨叶直径的 20% 时,数据稳定性最佳<sup>[17]</sup>。本文选用 0.2 个桨叶半径的桨叶间隙,使机身紧凑,所以设计的机架轴距可以由此系数关系计算。

本文已经确定采用 1855 旋翼,即桨叶直径为 45.72 cm,假设桨叶间隙为  $d$ ,中心板距旋翼轴距为  $l$ ,可以得到:

$$d = 0.2r \quad (22)$$

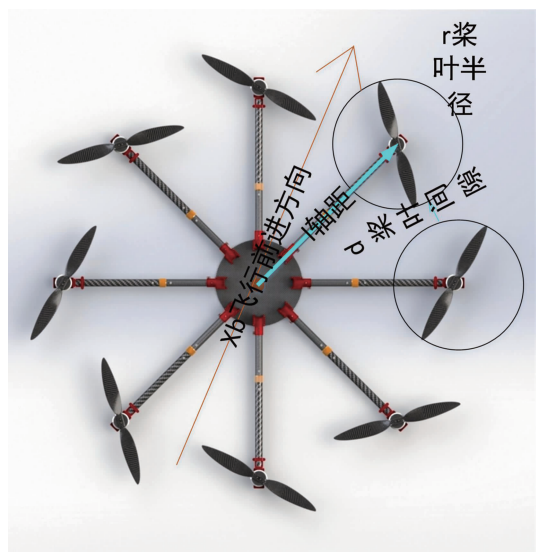


图 5 桨叶间隙与轴距关系

Fig. 5 The relationship between blade clearance and wheelbase

由图 5 可以看出,轴距、桨叶半径和间隙组成一个顶角为  $45^\circ$ ,腰长为轴距的等腰三角形,可以计算出:



$$l=\frac{r+\frac{d}{2}}{\sin 22.5^{\circ}}$$

(23)

结合公(22)、(23)可以求出轴距 $l\approx 65.709\ 66$  cm,所以总轴距为 131.419 32 cm,取值为 1 314 mm。

已经确定了机架布局和整体尺寸,并且选用 5008 电机和 1885 旋翼作为动力模块。首先根据厂家参数在 SolidWorks 中对电机进行了建模,但是桨叶的参数没有厂家数据,所以利用 3D 扫描进行了逆向设计如图 6。

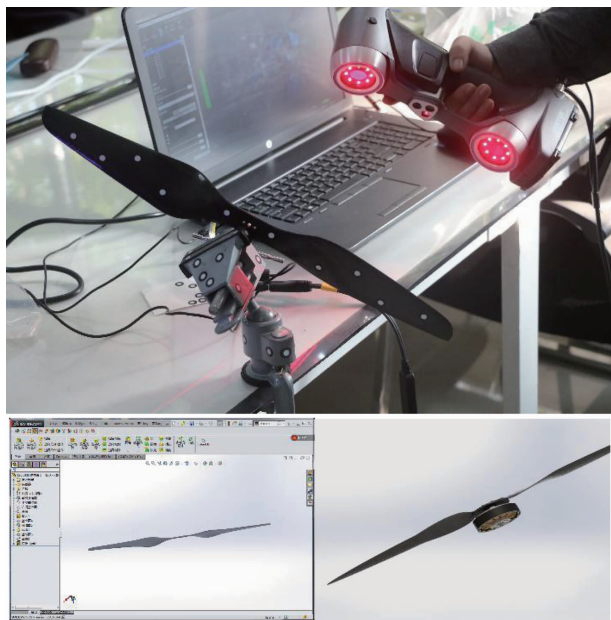


图 6 动力系统设计

Fig. 6 Power system design

八旋翼植保无人机的结构连接件采用材料为航空铝合金 2204,此材料在飞机上通常被用作蒙皮翼肋等,抗疲劳、韧性好且密度小。机架中心板和支撑杆都要求高强度且轻质的材料来达到设计要求,选用 AS4C 碳纤维(3 000 丝)作为支撑件,碳纤维丝可以与几乎所有的热固性和热塑性树脂材料进行组合,这种材料用于纺织、编织、长丝缠绕的应用上,加工后的碳纤维在压缩和挤压成型后用于生产机械零件和齿轮等,材料密度为  $1.78\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,拉伸极限为 4 150 MPa,断裂伸长率为 1.8%,弹性模量为 231 GPa<sup>[20]</sup>。

在设计药箱时,考虑到内表面平滑的药箱加过药水后会在飞行过程中产生震荡,对整体性能造成影响,所以选择将电池放在其上部并开出凹槽;另外在药箱侧边也开出凹槽对应脚架的倾斜 0 角度,在侧边增加药箱固定件增加约束,使药箱固定更加稳定,且减小水流的震荡,材料选择聚乙烯(PE),聚乙烯是一种坚固的轻量级热塑性材料,拥有极好的耐化学性如图 7。

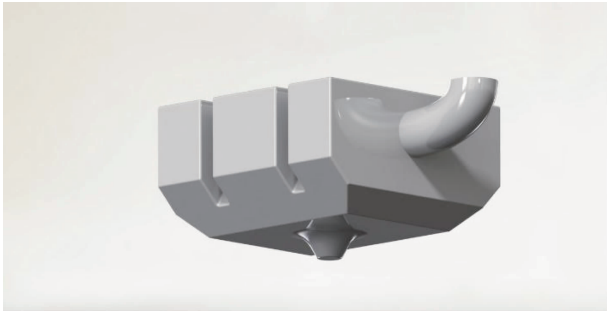


图 7 防震荡药箱设计

Fig. 7 Shockproof medicine box design

在 SolidWorks 对药箱进行 Flow Simulation 分析,设置边界速度为  $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,出口流量  $0.9\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,然后运行加载结果,可以得到涡量分布图(图 8 和 9),分析结果证明防震荡药箱的设计确实起到作用。无人机作业时因改变速度或方向会使药液震荡,流体涡流分布不集中,可以减小药液的冲击。

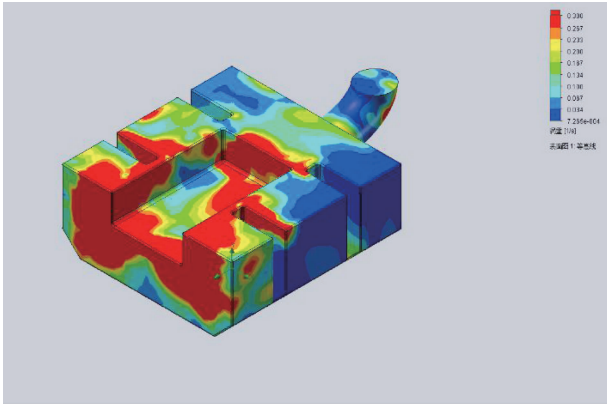


图 8 药箱流体表面图

Fig. 8 Medicine box fluid surface map

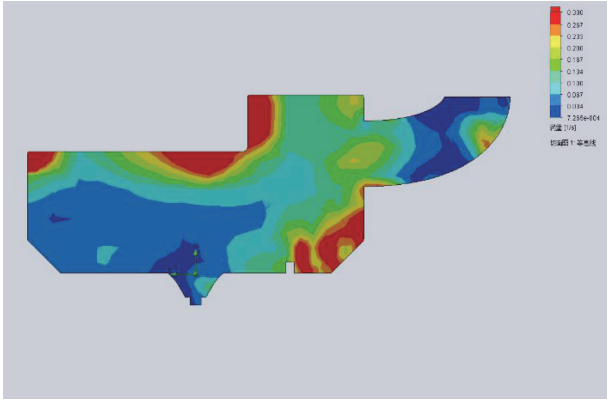


图 9 药箱内部流体切面图

Fig. 9 Medicine box internal fluid cutaway

经过零件和系统的单独设计,八旋翼植保无人机已经成型。植保目前无人机的理论参数可以通过 SolidWorks 的评估属性可以得出,植保无人机不含飞控、电池和喷杆时的重量约为 10.8 kg,加上剩余的各部件后自重大约为 13 kg,起飞重量达到 23 kg,动力系统完全满足要求,所以设计符合最初制定

的标准。考虑到田间环境和喷药影响,利用工程塑料(ABS)做成中心板外壳保护飞行控制器和多个机架固定件(图 10),参数配置如表 1。



图 10 多旋翼植保无人机  
Fig. 10 Multi-rotor planting UAV  
表 1 多旋翼植保无人机参数配置

Table1 Multi - rotor planting UAV  
configuration parameters

参数 Parameter	数值 Value
工作尺寸 Working size/mm	1420 × 1420 × 586
折叠尺寸 Folding size/mm	688 × 688 × 586
轴距 Rotor diameter/mm	1 350
作业速度 Working speed/m·s <sup>-1</sup>	6 ~ 8
起飞重量 Take-off weight/kg	23
作业高度 Working height/m	1 ~ 5
药箱容量 Tank capacity/L	10
喷幅长度 Spray length/m	2 ~ 6
喷头类型 Nozzle type	压力扇形喷头
喷头数量 Number of nozzles	4
电池 Battery	22.8 V, 16 000 mAh × 2

3 结论与讨论

本研究通过运动分析得到多旋翼飞行器的控制效率模型,结合试验情况确定改进的主要参数。利用自下而上的装配方法来对机架进行建模,通过

建立动力系统模型、电机底座、机架支撑杆、中心板、机架臂折叠件、脚架固定件这一系列零件,完成机架平台的建模。通过 SolidWorks Simulation 对零件进行了仿真分析并优化模型,使机架平台结构变得更加稳定。

植保机械最重要的是机电液一体化,机械能够输出动力提供稳定环境,电子技术可以进行变量控制和精确施药,药液是防治效果的重要手段,只有三方面协调兼容作业,才能真正做到“减量不减效”的化学防治。虽然本文在机械结构方面做出了大量工作,但是作业是否高效还要结合控制程序和农药的性质做整体分析,另外,应做出样机进行田间实验对性能做出实际评估。本文的研究结果对设计和使用多旋翼植保无人机均具有极强的指导意义和参考价值。

参考文献

[1] 周志艳,臧英,罗锡文,等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 1-10. (Zhou Z Y, Zang Y, Luo X W, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24): 1-10. )

[2] 郭永旺,袁会珠,何雄奎,等. 我国农业航空植保发展概况与前景分析[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(10): 78-82. (Guo Y W, Yuan H Z, He X K, et al. Overview and prospect analysis of China's agricultural aviation plant protection development [J]. China Plant Protection, 2014, 34(10): 78-82. )

[3] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59. (Zhang D Y, Lan Y B, Chen L P, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (10): 53-59. )

[4] Yamaha Remotely Piloted Helicopters [DB/OL]. <https://www.yamahamotorsports.com/motorsports/pages/precision-agriculture>,2016.

[5] 杨陆强,果霖,朱加繁,等. 我国农用无人机发展概况与展望[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 6-11. (Yang L Q, Guo L, Zhu J F, et al. The development situation and prospect of agricultural UAV in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(8):6-11. )

[6] 周志艳,明锐,臧禹,等. 中国农业航空发展现状及对策建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 1-13. (Zhou Z Y, Ming R, Zang Y, et al. Development status and countermeasures of agricultural aviation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 1-13. )

[7] 徐小杰,陈盛德,周志艳,等. 植保无人机主要性能指标测评方法的分析与思考[C]. 北京: 国际精准农业航空会议, 2016. (Xu X J, Chen S D, Zhou Z Y, et al. Analysis and reflection on the evaluation methods of main performance indicators for

plant protection drones [ C ]. Beijing: International Conference on Precision Agricultural Aviation, 2016. )

[ 8 ] 刘剑君, 贾世通, 杜新武, 等. 无人机低空施药技术发展现状与趋势[ J ]. 农业工程, 2014, 29( 5 ): 25-29. ( Liu J J, Jia S T, Du X W, et al. Development status and trends of low-altitude unmanned aerial vehicles spraying technology [ J ]. Agricultural Engineering, 2014, 29( 5 ): 25-29. )

[ 9 ] 薛新宇. 航空施药技术应用及对水稻品质影响研究[ D ]. 南京: 南京农业大学, 2013. ( Xue X Y. Applications of modern pesticide aerial application technology and the impact on rice quality [ D ]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. )

[ 10 ] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[ J ]. 农业工程学报, 2014, 30( 5 ): 50-56. ( Qin W C, Xue X X, Zhou L X, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies[ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30( 5 ): 50-56. )

[ 11 ] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[ J ]. 农业工程学报, 2016, 32( 17 ): 40-46. ( Chen S D, Lan Y B, Li J Y, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32( 17 ): 40-46. )

[ 12 ] 高圆圆. 无人直升机( UAV )低空低容量喷洒农药雾滴在禾本科作物冠层的沉积分布及防治效果研究[ D ]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013. ( Gao Y Y. Study on the deposition, distribution and control effect of low-altitude and low-volume pesticide spraying droplets of unmanned helicopters( UAV ) in grass crops [ D ]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. )

[ 13 ] 李赫, 秦超彬, 刘道奇, 等. 多旋翼植保无人机施药技术研究[ C ]. 北京: 全国大豆学术讨论会, 2017. ( Li H, Qin C B, Liu D Q, et al. Research on multi-rotor plant protection UAV application technology [ C ]. Beijing: National Soybean Symposium, 2017. )

[ 14 ] 杨风波, 薛新宇, 蔡晨, 等. 多旋翼植保无人机悬停下洗气流对雾滴运动规律的影响[ J ]. 农业工程学报, 2018, 34( 2 ): 64-73. ( Yang F B, Xue X Y, Cai C, et al. Effects of the multi-rotary winged plant protection drone hovering under scrubber airflow on the movement of droplets [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34( 2 ): 64-73. )

[ 15 ] 王大伟, 高席丰. 植保无人机药箱建模与姿态控制器设计[ J ]. 排灌机械工程学报, 2015, 33( 11 ): 1006-1012. ( Wang D W, Gao X F. Liquid tank modelling and attitude controller design of plant protection UAV [ J ]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33( 11 ): 1006-1012. )

[ 16 ] 王斌. 八旋翼电动植保无人机的研制与试验分析[ D ]. 长春: 吉林农业大学, 2017. ( Wang B. Development and experimental analysis of eight-rotor wing power plant protection drone [ D ]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017. )

[ 17 ] 王传之. 夏大豆除草剂的选择应用及药害防治要点[ J ]. 大豆科技, 2016( 3 ): 12-15. ( Wang C Z. Selection and application of summer soybean herbicides and points for control of pest control [ J ]. Soybean Science and Technology, 2016( 3 ): 12-15. )

[ 18 ] Harrington A M. Optimal propulsion system design for a micro quad rotor [ D ]. USA: University of Maryland College Park, 2011.

[ 19 ] Yoon S, Lee H C, Pulliam T H. Computational analysis of multi-rotor flows [ C ]. USA: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016.

[ 20 ] Sarac A S, Serantoni M, Tofail S A M, et al. Morphological and spectroscopic analyses of poly [ N-vinylcarbazole-co-vinylbenzene-sulfonic acid ] copolymer electro grafted on carbon fiber: The effect of current density [ J ]. Applied Surface Science, 2004, 229( 1-4 ): 13-18.