

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2026.03.018

周峥琦, 周浩波, 麦煜炬, 等. 采摘无人机风场的数值模拟与试验分析[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(3): 128-133

Zhou Zhengqi, Zhou Haobo, Mai Yuju, et al. Numerical simulation and experimental analysis of wind field of a picking UAV [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(3): 128-133

采摘无人机风场的数值模拟与试验分析*

周峥琦¹, 周浩波¹, 麦煜炬¹, 巫凯旋¹, 施琳琳¹, 李君^{1, 2, 3}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州市, 510642; 2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州市, 510642;
3. 农业装备技术全国重点实验室, 北京市, 100083)

摘要: 采摘无人机进行采摘作业时, 其稳定性受果实重量产生的突变载荷以及果树冠层的风场回流等因素影响而降低。无人机风场变化是其稳定性变化的直接原因。为提高采摘无人机采摘过程的稳定性, 需对采摘无人机的采摘瞬态风场变化进行研究。基于 LBM-LES 仿真方法对无人机风场进行仿真, 并搭建试验平台对结果进行验证。仿真试验结果表明: 采摘无人机在悬停时, 下洗气流稳定, 升力相对稳定; 采摘无人机在不断靠近果树的过程中, 飞行效能变差; 在采摘距离为 0.4~0.6 m 时, 采摘无人机所受果树冠层风场影响较小; 采摘过程中, 采摘无人机前方旋翼气流会先发生变化, 影响后旋翼气流发生形变, 继而造成稳定性降低。仿真结果跟测试试验结果最大误差为 9.7%, 在试验误差允许范围内, 其结果可以为采摘无人机的控制以及气动性能优化提供参考依据。

关键词: 采摘无人机; 风场; 瞬态流场; 流场分析; 数值模拟; 气动性能

中图分类号: S23; S25 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2026) 03-0128-06

Numerical simulation and experimental analysis of wind field of a picking UAV

Zhou Zhengqi¹, Zhou Haobo¹, Mai Yuju¹, Wu Kaixuan¹, Shi Linlin¹, Li Jun^{1, 2, 3}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China;

2. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agricultural Science and Technology, Guangzhou, 510642, China;

3. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing, 100083, China)

Abstract: The stability of a harvesting drone decreases when its load changes suddenly, such as when it picks fruit, and due to external factors like wind within the tree canopy. Variations in the surrounding wind field are the primary cause of these stability fluctuations. Therefore, understanding the transient changes in the wind field around the drone is essential for improving its stability during harvesting. In this study, the wind field around the drone was simulated using the Lattice Boltzmann Method (LBM) combined with Large Eddy Simulation (LES), and the results were validated through an experimental platform. The simulation results showed that the airflow beneath a hovering harvesting drone remained stable, providing consistent lift. However, as the harvesting drone approached the fruit tree, its flight efficiency decreased. Nevertheless, when the harvesting distance was between 0.4 m and 0.6 m, the influence of canopy wind on the harvesting drone became minimal. During harvesting, the airflow around the front rotors changed first, which then affected the airflow deformation of the rear rotor, ultimately reducing overall stability. The maximum error between the simulation results and the test experiment results was 9.7%, the simulation results of this study fell within the experimental margin of error, providing a reliable reference for improving control strategies and optimizing the aerodynamic performance of harvesting drones.

Keywords: picking UAV; wind field; transient flow field; flow field analysis; numerical simulation; aerodynamic performance

收稿日期: 2024 年 6 月 24 日 修回日期: 2025 年 10 月 20 日

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52375094); 国家荔枝龙眼产业技术体系建设专项(CARS-32); 岭南现代农业科学与技术广东省实验室科研项目(NT2021009)

第一作者: 周峥琦, 男, 1997 年生, 湖南祁阳人, 硕士研究生; 研究方向为水果采摘无人机。E-mail: 2021zq@stu.scau.edu.cn

通讯作者: 李君, 男, 1978 年生, 湖南祁东人, 博士, 教授; 研究方向为农业装备、现代车辆的设计及其智能控制技术。E-mail: autojunli@scau.edu.cn

0 引言

随着无人机技术的不断发展,其在农业上的应用也愈发广泛。采摘无人机以无人机为移动载体,通过末端执行器完成采摘作业任务,在三维空间中相较于地面采摘机器人具有更高的自由度与灵活性^[1]。针对长势较高的果树以及山间果园,采摘无人机可以较好地完成采摘作业。目前有以色列某公司对采摘无人机进行了多年的研究,推出了一种以无人机采摘为核心的果园收获商业方案。该无人机具备一前伸的机械臂,通过视觉传感器对果实的位置与成熟度进行识别^[2]。

采摘无人机的飞行稳定性是采摘作业中的关键问题。在采摘瞬间,采摘无人机会受到一个向下的突变载荷,导致无人机发生一个俯仰动作,此时的无人机风场会受到严重破坏,若叠加果树冠层对无人机风场的影响,可能会导致无人机失稳^[3]。旋翼无人机的流场分析对其飞行稳定性具有重要意义,流场分析可以帮助确定无人机在各种飞行条件下的动态稳定性^[4]。因此,对采摘无人机采摘瞬态时的风场进行仿真分析,对提高采摘无人机稳定性具有重要意义^[5]。

Tang^[6]采用了LBM(Lattice Boltzmann method)数值模拟了六旋翼植保无人机的下洗气流场。本文通过使用LBM—LES相结合的数值模拟方法,可以有效应对风场剧烈变化的情况,对采摘无人机采摘瞬态过程进行流体仿真,从而分析采摘无人机在复杂果园环境中的工作流场特性,为提高采摘无人机稳定性提供参考依据。

1 研究方法介绍

1.1 LBM方法

Lattice Boltzmann方法是一种基于介观尺度且不同于传统的CFD数值模拟的计算方法。因为,从离散的网格上来说,LBM具有Euler方法的属性;但从它基于介观尺度,统计粒子分布的方式来看,LBM又具有Lagrange方法的属性^[7]。LBM主要分为碰撞、迁移两部分,整个流场被分割成相同的格子,时间上也被分割为一定的时间步长,在每一个时间步长内,粒子分布函数在格点上进行一次碰撞—迁移过程,最后,通过统计微观粒子的运动情况来实现宏观流动的模拟^[8]。

1.2 LES方法

LES比DNS方法具有更高的效率,而且与RANS方法相比,能够得到瞬时流场。所以,将LES引入LBM中能够有效地提高LBM对无人机瞬态流场的模拟精度^[9]。LBM—LES混合方法主要是将大涡模拟的思想加入LBM中。随着 Re 数的提高,黏度减

小,最大速度梯度影响收敛,而过密的网格引起压缩性误差。引入大涡模拟的思想,即湍流黏性系数由Smagorinsky模型计算^[10]。所使用的LBM—LES方法就是由LBM与大涡模拟技术中的Smagorinsky模型结合而成的一种方法。在现代CFD代码中,不同软件对应的 C_k 常数各有不同。在XFLOW仿真环境中,模型中 C_k 常数设置为0.12。

2 仿真模型建立

2.1 采摘无人机模型

该采摘无人机的模型是建立在大疆M300基础之上,无人机的三维模型通过SolidWorks进行1:1建模,其中包括对无人机叶片、机身和采摘杆的物理建模。为保证仿真结果的精度,无人机的旋翼采用3D扫描仪进行建模^[11]。通过扫描模型重建技术对现有的无人机旋翼进行三维扫描重建,通过逆向工程获得旋翼结构参数,然后在SolidWorks中对旋翼进行后处理。图1为采摘无人机整机模型俯视图。

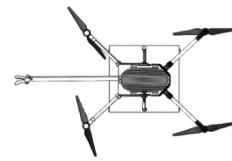


图1 采摘无人机的整机模型

Fig. 1 Integrated model of the harvesting drone

采摘无人机的具体参数如表1所示。

表1 无人机参数

Tab. 1 Drone parameters

参数	数值
机身尺寸(长×宽×高) /(mm×mm×mm)	810×670×430
对称电机轴距/mm	895
整机重量/kg	12.18
采摘杆长度/cm	60
叶片直径/cm	53.34

2.2 采摘无人机与果树交互模型的建立

以高3m、直径1.2m的果树为模型,采用多孔介质模型模拟作物对气流的阻挡作用。多孔介质模型基于Darcy-Forchheimer定律^[12],如式(1)所示。

$$s = -\frac{\mu}{\alpha}v - c_2\alpha\frac{\rho}{2}|v|v \quad (1)$$

式中: S ——动量损失项;

μ ——动态黏度, $N \cdot s/m^2$;

α ——渗透率, $0.395 m^2$;

ρ ——流体密度, $1.225 kg/m^3$;

v ——气体流动速度;

c_2 ——惯性损失系数,0.4。

在仿真软件中,将果树模型设置为“Porous Jump”,“Porous Jump”边界条件用于模拟流体通过多孔介质的流动。这种边界条件特别适用于那些多孔区域的厚度相对于整个流动域来说很小,且具体的多孔结构细节对整体流动影响不大,或者是在仿真中直接模拟整个多孔结构代价太高的情况^[13]。图2为无人机与果树的交互模型。

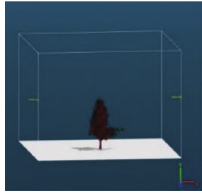


图2 采摘无人机与果树的交互模型
Fig. 2 Interaction model between the harvesting drone and the fruit tree

2.3 仿真边界条件设定

在计算中,仿真类型选择单项外部流,其中计算域在 Z 、 X 、 Y 轴方向上的尺寸为 $8\text{ m} \times 15\text{ m} \times 12\text{ m}$ 。果树立于坐标原点之上,树的最大直径为 4 m ,高度为 6 m ,边界条件设置为多孔介质跳跃边界模型。将 XOZ 平面设置为地面,考虑 y 轴方向的重力加速度,重力加速度设为 -9.8 m/s^2 。无人机旋翼是产生升力和下洗气流场的关键部件。为了准确获取气流场,将4个转子周围的晶格分辨率设置为 0.025 m ,将机架和臂的分辨率设置为 0.1 m ,将计算域的全局空间离散分辨率设置为 0.2 m ,将气流尾迹分辨率设置为 0.0125 m 。时间步长为 0.01 s 。采摘无人机的旋翼转速通过转速传感器测得,姿态变化通过姿态传感器获取后,在仿真环境中进行设置。

3 仿真结果分析

3.1 无果树模型环境采摘无人机悬停风场特性

为探究无人机在悬停无果树情况下跟无人机采摘情况下流场的区别,首先对M300在无果树模型的环境下进行仿真,飞行高度为 2 m ,旋翼转速为 $7\ 000\text{ rad/s}$ 。最后得出的无人机仿真结果如图3所示。

图3为无人机起飞后时间 $t=0.5\text{ s}$ 、 $t=1\text{ s}$ 、 $t=1.5\text{ s}$ 、 $t=2\text{ s}$ 时无人机风场的 YOX 面的剖视图。根据仿真结果分析, $t=0.5\text{ s}$ 时,下洗气流接触到地面,但是还未向周围扩散。 $t=1\text{ s}$ 时,无人机旋翼下方 0.4 m 处,旋翼气流间形成干涉,下洗气流在地面处开始形成上卷扬,向两边不断扩散。 $t=1.5\text{ s}$ 时,无人机下洗气流在地面已经不再扩散,下洗气流呈“八”字状。 $t=2\text{ s}$ 时,下洗气流收缩呈柱状,气流柱已经成型,无人机处

于相对稳定状态,旋翼间干扰也较少。旋翼间的扰动较少,意味着无人机气动性能较好^[14]。

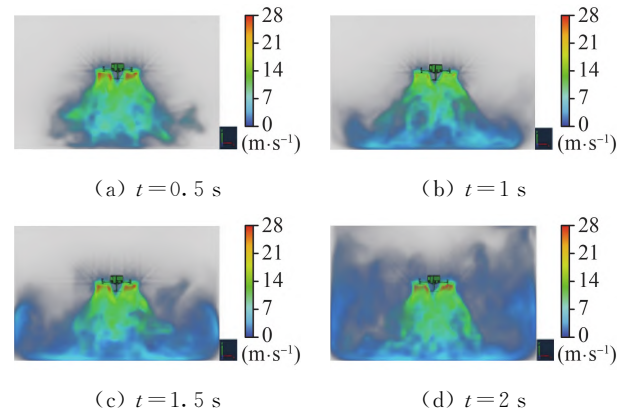


图3 无人机悬停风场

Fig. 3 Measurement of the drone hovering downwash

3.2 采摘无人机—果树冠层交互风场特性

在采摘无人机采摘的过程中,随着无人机不断地靠近果树,无人机与果树之间风场的交互影响会更强烈,可能造成无人机稳定性降低^[15]。因此,为了解这一过程中无人机风场的特性变化,设置多组果树与无人机之间的距离进行仿真试验。距离 d 是从无人机旋翼前方至果树边缘的距离。分别取 $d=0.6\text{ m}$ 、 $d=0.4\text{ m}$ 、 $d=0.2\text{ m}$ 、 $d=0\text{ m}$ 、 $d=-0.2\text{ m}$ 五组变量。

根据结果分析,图4(a)表示 $d=0.6\text{ m}$ 时的风场仿真,这时采摘无人机前方的下洗流柱有轻微的干扰,后方旋翼的下洗流柱相对稳定。无人机下洗气流干扰较少且稳定,意味着飞行性能比较稳定^[16]。

如图4(b)所示,无人距离为 0.4 m 时,采摘无人机与果树之间会开始产生交互影响,采摘无人机的与前方的果树会形成一个回流,下洗流注会受到干扰略微发生倾斜,采摘无人机的风场会受到一定干扰,导致无人机气动性能降低。但是两旋翼间气流干扰较少,且未发生明显分流及断层现象,因此飞行性能相对稳定。

如图4(c)所示, $d=0.2\text{ m}$ 时,果树对采摘无人机风场的影响更明显。采摘无人机后旋翼产生的气流受到干扰,气流开始分流,后旋翼的升力效率会降低。前旋翼产生的气流受到果树冠层的影响,只有少部分气流穿透冠层,因此受到回流的影响较大。此时,无人机整体飞行稳定性较差,可能会发生漂移等问题。

如图4(d)所示,无人机再向前进至 0 m 的过程中,此时采摘无人机前后旋翼的下洗流柱相对趋于平稳,前方旋翼因下洗气流较大,大部分穿透冠层,无人机前方旋翼受到的扰动减少,无人机后旋翼因为受到果树冠层的影响,后旋翼下洗气流发生逸散现象,但是逸散气流较少,因此无人机飞行稳定性较 $d=0.2\text{ m}$ 时有所提高。

如图 4(e)所示,当无人机在距离 $d = -0.2 \text{ m}$ 时,无人机前方旋翼会部分覆盖果树冠层,此时无人机前方旋翼的下洗气流会遇到阻碍向两边扩散,同时在下方形成一个回旋涡。后方尾迹气流量增大,偏角增大。此时采摘无人机的飞行效率相对较差。

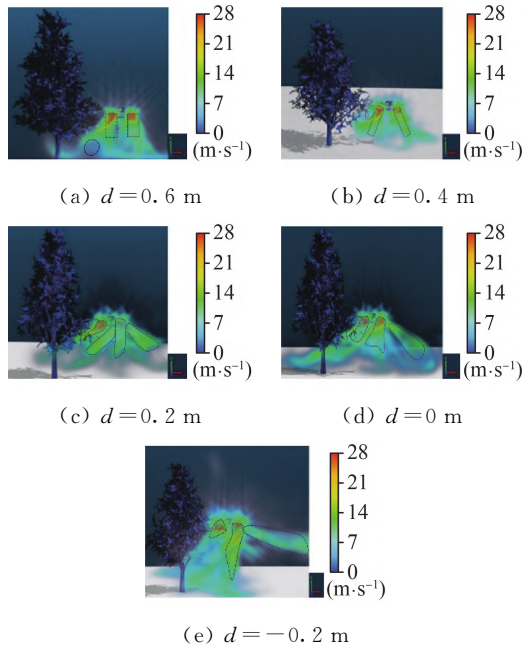


图 4 采摘无人机与果树不同距离的风场特性

Fig. 4 Characteristics of the drone-induced wind field at varying distances

因此,在距离为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m}$ 时,无人机受到果树的影响较小。当 $d = 0.2 \text{ m}$ 时,冠层回流对无人机影响较大,此时的无人机气流大部分无法穿透冠层,后旋翼气流发生分流,无人机气动性能较差^[17]。当无人机继续前进时,气动性能相对 $d = 0.2 \text{ m}$ 有所提升,在采摘过程中,需要尽量避免风场影响最大的情况。

3.3 采摘无人机采摘瞬态风场变化及分析

为探究采摘无人机采摘瞬间所受到的风场强度变化,先使用姿态检测传感器获取无人机的姿态变化函数,再从激光转速传感器得到无人机的旋翼转速^[18]。在仿真环境中,测试无人机在距离目标监测点为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m}$ 时气动性能较好,因此设置果树与无人机的距离为 0.4 m ,设置好边界条件和采摘无人机的运动函数。图 5 为采摘无人机姿态函数,此次采摘试验果实的重量为 0.6 kg 。

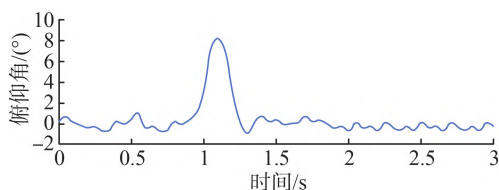


图 5 无人机姿态变化曲线

Fig. 5 Attitude curve of the harvesting drone

仿真结果如图 6 所示,选取 6 个采摘无人机采摘姿态的仿真结果来对采摘无人机瞬态过程进行分析。图 6(a)~图 6(f)代表对应采摘过程不同姿态角的仿真云图。图 6(a)表示此时采摘无人机处于水平状态,此时采摘无人机的下洗流风场有少量气流分散。图 6(b)表示俯角为 3.5° ,无人机前方旋翼气流发生变形,两个下洗气流间有少量干扰,桨叶做功效率开始下降。图 6(c)所示,采摘无人机此时达到最大的俯角 8.5° ,此时无人机的前后旋翼的下洗流场干涉严重,且后旋翼尾迹气流出现折弯,流迹梯度变化大,此时无人机气动性能较差。图 6(d)表示回升俯角至 3.5° ,前方旋翼气流先恢复,后方气流柱发生形变。图 6(e)首次回升至水平状态,此时的无人机下洗流柱仍未成型。图 6(f)表示无人机稳定在水平状态, $t = 1.5 \text{ s}$,此时的无人机旋翼气流向下扩散,气动性能相对稳定,有少量分散气流,会降低旋翼的做功效率,但无人机整体趋于稳定状态^[19]。

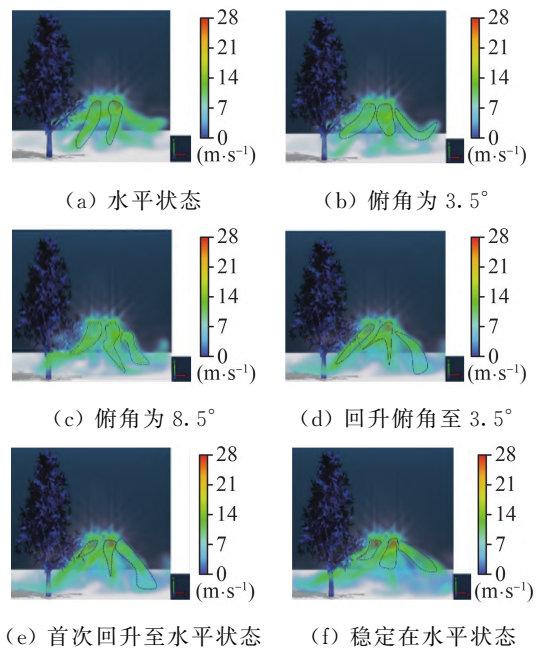


图 6 采摘无人机采摘瞬态风场特性

Fig. 6 Transient downwash characteristics during fruit picking by the drone

综上,无人机在采摘瞬态的过程中,前方旋翼气流会先发生变化,影响后旋翼气流发生形变,继而发生部分气流断裂现象。在回升过程中,前方旋翼气流先恢复至稳定状态,后旋翼气流随后恢复。因此,如果在采摘之前,可以通过改变前方旋翼转速,使采摘无人机前方旋翼气流柱更稳定,会有利于采摘无人机整体气动稳定性提高^[20]。

4 试验验证及分析

4.1 无人机悬停风场测试

为验证仿真试验中试验数据的准确性,分别对采摘

无人机悬停时和采摘时的风场进行测试。图 7 为无人机悬停风场测试。测试平台由铝合金支架,风速仪,转速传感器组成,传感器通过固定孔位用螺栓以及扎带固定在支架上,测试支架与地面水平接触。取无人机机身中心坐标系为(0,0,0),在仿真环境中风速传感器 1 位置为(-0.5,-0.4,-0.3),风速传感器 2 位置为(-0.5,-0.7,-0.3)。在风场测试中,风场测试支架上搭载风速传感器以及转速传感器,转速测速仪的最大量程为 99 999 r/min,激光功率为 2~5 mW,采样率为 1 次/s,尺寸为 55.7 mm×29.9 mm×127 mm,重量为 106 g。热敏式风速仪风速范围为 0.1~30 m/s,风速解析度为 0.01 m/s,探测杆伸缩长度为 1.17 m,重量为 280 g。风速仪风速范围为 0.1~32 m/s,风速解析度为 0.01 m/s。

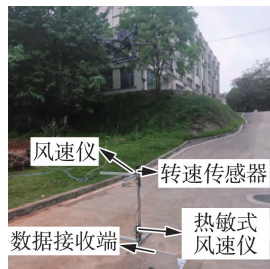


图 7 无人机悬停风场测试

Fig. 7 Hovering downwash test of the drone

图 8 为仿真环境中风速传感器 1 与仿真环境中风速传感器 2 以及试验平台风速仪的风速值曲线图。根据仿真结果分析,传感器 1 与其风场测试值最大误差为 9.7%。在 2 s 之后,其误差在 5% 以下,是因为在 2 s 之前,无人机风场未达到稳定状态,稳定之后,无人机风场变化幅值变小,风场梯度下降,且测试值误差更小。传感器 2 设置在传感器 1 下方,其数据表明在无人机旋翼气流刚接触地面时风场变化较大,在 2 s 后趋于稳定状态,与悬停下洗气流风场特征相符。

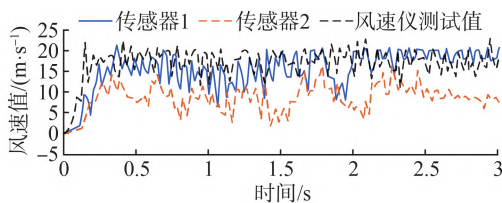


图 8 仿真结果对比

Fig. 8 Comparison between simulation and experimental results

4.2 无人机采摘瞬态风场测试

图 9 为采摘无人机测试采摘过程风场的试验。采摘无人机从正前方进行采摘。以采摘目标为原点(0,0,0),风速仪测试点位(-0.6,-0.5,0.3)。同时,需要在仿真软件中相同点位设置风速传感器,对比仿真试验与测试值间的大小。



图 9 采摘无人机风场测试试验

Fig. 9 Wind field test experiment of the harvesting drone

图 10 是采摘无人机采摘瞬态仿真环境中传感器的数值,以及风速仪的测试数值。采摘无人机测试最大误差出现在采摘无人机俯仰过程中,原因是此时的风场变化较为剧烈,无法精准测量,最大误差为 5.4%,整体误差在试验允许范围内,因此可以证明在该仿真环境中,采摘瞬态仿真结果比较准确。

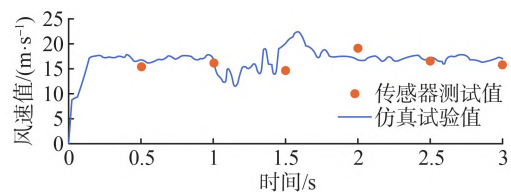


图 10 采摘无人机风场测试结果

Fig. 10 Test results of the harvesting drone's downwash

5 结论

使用 LBM—LES 方法对采摘无人机以及果树模型进行仿真,其中包括对无人机模型悬停下的仿真,无人机与果树交互的仿真,以及采摘无人机采摘瞬间的流场仿真。

1) 采摘无人机在悬停状态下气流场相对稳定,一般在 $t=1.5$ s 时,无人机的气流柱可以达到相对稳定状态,使用热敏式风速仪测量,测量值跟仿真值在误差范围内,证明在仿真环境中模拟无人机风场结果是可靠的。

2) 随着无人机不断靠近果树,其风场变化也越剧烈,飞行受到的干扰越大,尤其在距离 0.2 m 左右时,无人机前旋翼下洗流与果树冠层交互影响较大,此时无人机的扰动最为剧烈。当无人机继续接近目标点时,无人机气动性能又相对 $d=0.2$ m 时较稳定,因此在采摘过程中,需要避免采摘无人机风场影响最大的情况。

3) 无人机在采摘瞬态的过程中,前方旋翼气流会先发生变化,影响后旋翼气流发生形变,继而发生部分气流断裂现象。在回升过程中,前方旋翼气流先恢复至稳定状态,后旋翼气流随后恢复。因此,如果在采摘之前,可以通过改变前方旋翼转速,使采摘无人机前方旋翼气流柱更稳定,有利于采摘无人机整体的气动稳定性提高。

参 考 文 献

- [1] 谢嘉, 吴家帧, 李永国, 等. 采摘无人机研究综述[J]. 制造业自动化, 2022, 44(10): 72-75.
Xie Jia, Wu Jiazhen, Li Yongguo, et al. Review of research on harvesting UAVs [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(10): 72-75.
- [2] Mathur A, Atkins E. Experimental aerodynamic analysis of a quadplane unmanned aircraft system [J]. Journal of Aircraft, 2023, 60(4): 1323-1328.
- [3] 周川川, 李傲梅. 多旋翼无人机旋翼风场分布情况研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(11): 183-189.
Zhou Chuanchuan, Li Aomei. Research on the distribution of rotor wind field in multi-rotor UAV [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(11): 183-189.
- [4] 龙赛琼, 黄心深, 李浩, 等. 微小型多旋翼无人机抗风能力测试平台的研发[J]. 机电工程技术, 2021, 50(4): 159-160, 270.
Long Saiqiong, Huang Xinshen, Li Hao, et al. Development of a test platform for wind resistance of micro multi-rotor UAVs [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(4): 159-160, 270.
- [5] 田志伟, 薛新宇, 徐阳, 等. 植保无人机下洗气流对作物冠层作用规律研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 40-48.
Tian Zhiwei, Xue Xinyu, Xu Yang, et al. Study on the effects of downwash airflow of plant-protection UAVs on crop canopy [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 40-48.
- [6] Tang Q, Zhu Y, Guo Q, et al. High-accuracy, high-resolution downwash flow field measurements of an unmanned helicopter for precision agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105390.
- [7] 王涛, 文晟, 兰玉彬, 等. 基于 PINNs 的单旋翼植保无人机下洗流场预测模型[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 83-91.
Wang Tao, Wen Shen, Lan Yubin, et al. Prediction model of the down-wash airflow field of a single-rotor plant-protection UAV based on physics-informed neural networks (PINNs) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(6): 83-91.
- [8] Zhu Y, Tang Y, Guo Q, et al. CFD simulation and measurement of the downwash airflow of a quadrotor plant protection UAV during operation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107286.
- [9] Wang L, Zhu Y, Guo Q, et al. Numerical verification on influence of multi-feature parameters to the downwash airflow field and operation effect of a six-rotor agricultural UAV in flight [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191: 106425.
- [10] Yang F, Zhu Y, Lan Y, et al. Numerical simulation and experimental verification on downwash airflow of six-rotor agricultural UAV in hover [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 56-64.
- [11] Zhang H, Qi L, Wan J, et al. Numerical simulation of downwash airflow distribution inside tree canopies of an apple orchard from a multirotor unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195: 106817.
- [12] Guo Q, Zhu Y, Tang Y, et al. Numerical simulation of the effects of downwash airflow and crosswinds on the spray performance of quad-rotor agricultural UAVs [J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 11: 100940.
- [13] Fan G, Liu Z, Qin Y, et al. Airflow characteristics of rotorcraft plant protection UAV operating in rice fields [J]. Biosystems Engineering, 2023, 226: 209-222.
- [14] Coombes M, Newton S, Knowles J, et al. The influence of rotor downwash on spray distribution under a quadrotor unmanned aerial system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106807.
- [15] Hu Z, Zhu J, Wang H. Experimental research on UAV stability based on vibration signal measurement of UAV motors [C]. 2021 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT). IEEE, 2021: 131-134.
- [16] Shamsudin S S, Madzni M Z. Aerodynamic analysis of quadrotor UAV propeller using computational fluid dynamic [J]. Journal of Complex Flow, 2021, 3(2): 28-32.
- [17] Sajjadi H, Salmanzadeh M, Ahmadi G, et al. Simulations of indoor airflow and particle dispersion and deposition by the lattice Boltzmann method using LES and RANS approaches [J]. Building and Environment, 2016, 102: 1-12.
- [18] Han M, Ooka R, Kikumoto H. Lattice Boltzmann method-based large-eddy simulation of indoor isothermal airflow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 700-709.
- [19] Paz C, Suárez E, Gil C, et al. CFD analysis of the aerodynamic effects on the stability of the flight of a quadcopter UAV in the proximity of walls and ground [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104378.
- [20] Chang K, Chen S, Wang M, et al. Numerical simulation and experimental verification of rotor airflow field based on finite volume method and lattice Boltzmann method [J]. Drones, 2024, 8(11): 612.