

六旋翼植保无人机风场竖直分布特性数值模拟与验证

王 玲 张 旗 侯启航 陈 度 王书茂

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 植保无人机作业过程中,旋翼风场竖直方向分布特性对雾滴的输运效应及作物冠层的扰动作用直接影响施药沉积效果。本文以六旋翼植保无人机风场竖直分布为研究对象,采用基于格子玻尔兹曼方法的数值模拟技术建立了无人机前飞作业时旋翼风场仿真模型,并根据正交试验方法研究了多特征参数融合对风场竖直分布特性的影响。仿真结果表明,竖直分布风场垂直于飞行方向对称分布,当飞行高度和飞行速度增加或作业载荷减小时,风场强度逐渐减弱;竖直分布风场沿侧风方向倾斜,侧风风速大于 3 m/s 时,风场横向倾斜超 45°。基于此,采用恒温差热敏芯片研制了微型无线风速采集系统,并开展了植保无人机风场竖直分布特性的多因素田间验证试验,试验结果表明:仿真模拟与田间试验旋翼风场竖直分布规律基本一致,相对误差较小,风场竖直分布特性具有较好的一致性;数值模拟方法可有效模拟植保无人机飞行过程的非定常流动,仿真与田间试验结果为植保无人机雾滴沉积的研究提供了理论基础。

关键词: 六旋翼植保无人机; 风场竖直分布; 微型无线风速采集系统; 多特征参数
中图分类号: S252⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0075-09

Vertical Distribution Law of Six-rotor Plant Protection UAV Based on Multi-feature Parameters

WANG Ling ZHANG Qi HOU Qihang CHEN Du WANG Shumao
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: During the operation of plant protection UAV, the vertical distribution law of the rotor wind field and the wind speed have a direct impact on the transport effect of droplets and the disturbing effect of the crop canopy. Taking the vertical distribution of the six-rotor UAV as an object, the simulation model of the rotor wind field using the numerical simulation technology based on the lattice Boltzmann method was established when UAV flying. In addition, according to the orthogonal test method, the influence of multi-feature parameter fusion on the vertical distribution of wind field and wind speed was studied. The simulation results showed that the vertical distribution wind field was symmetrically distributed perpendicular to the flight direction. When the flight height and flight speed increased or the operating load decreased, the wind field intensity was gradually weakened; the vertical distribution wind field was inclined along the crosswind direction, and when the crosswind wind speed was greater than 3 m/s, the lateral inclination of the wind field exceeded 45°. Besides, a miniature wireless wind speed acquisition system was developed based on the constant temperature difference thermal chip, and a multi-factor field verification test of the vertical distribution characteristics of the wind field of the plant protection UAV was carried out. The results showed that the vertical distribution law of the rotor wind field between the simulation and the field test was basically the same, the relative error was small, and the vertical distribution of wind field had good consistency. The numerical simulation method can effectively simulate the unsteady flow during the flight process of plant protection UAV, and the simulation and field test results would provide a theoretical basis for the study of the droplet deposition of the plant protection UAV.

Key words: six-rotor plant protection UAV; vertical distribution of wind field; mini-wireless wind speed acquisition system; multi-feature parameters

0 引言

植保无人机喷施作业中,旋翼风场与作物冠层的接触面积及旋翼风场内各方向风速强度直接影响喷雾雾滴的覆盖区域、穿透能力和沉积速率,决定喷施作业质量^[1-2]。为提高旋翼气流扰动效果,根据末速度原则,旋翼气流向下推进至作物冠层处时,仍然具有一定的末速度,从而携带雾滴穿透作物冠层,有效促进雾滴的穿透性能,增加雾滴在作物冠层上中下各部位及叶片背面的沉积量^[3]。因此,探明旋翼风场竖直方向的风场结构分布(即风场竖直分布)规律对旋翼无人机喷施作业中优化雾滴沉积效果具有重要意义。

目前,旋翼风场分布特性的研究主要采用田间试验方法与仿真模拟技术,仿真模拟对旋翼风场的研究集中在无人机悬停状态下风场结构分布特性的研究,而田间试验数据能比较真实地反映旋翼风场对雾滴沉积与飘移的影响结果,但对旋翼风场的形态及演变规律的研究尚少^[4-5]。GUO等^[6]使用Fluent模拟了四旋翼植保无人机悬停时下洗气流的时空分布,发现了气流由于地面效应而呈现的“上洗”现象。张豪等^[7-8]建立了六旋翼植保无人机悬停施药下洗气流时空分布的三维计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)模型,分析了竖直向下风场的变化规律。TANG等^[9]采用粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)技术获取了AF25B无人机直升机瞬时和平均速度场信息,分析了不同转速下雾滴的运动和沉积效果,在此基础上, TANG等^[10]基于玻尔兹曼数值模拟技术开展了不同高度下AF-25B直升机下洗流场和施药时空分布情况的研究,研究结果表明随施药高度变化,下洗气流场对雾滴的沉积位置及沉积均匀性有明显影响。文晟等^[11]对单旋翼无人机的旋翼流场进行了数值模拟,并基于室外试验研究了翼尖涡流对雾滴飘移的影响规律,试验结果表明单旋翼植保无人机飞行速度、喷头在旋翼下方的位置和喷杆垂直高度等因素中,无人机飞行速度对雾滴飘移的影响较明显。PARRA等^[12]应用Fluent分析了与六旋翼植保无人机空气动力学行为相关的物理变量,通过数值模拟的后处理,观察了风场的涡流、压力、湍流动能和颗粒体积等流体特性。YANG等^[13]基于模型迁移方法研究了六旋翼植保无人机下洗气流场的分布特性,并基于PIV技术对缩比模型进行了室内验证,对比试验结果表明仿真模拟的相对误差在12%以内。WU等^[14]在旋翼风场田间试验中,基于应变效应设计了一种无人机下洗气流场检测系统用于无人

机悬停状态下旋翼风场的检测,然而系统采集精确度还有待提高。TANG等^[15]开发了用于无人直升机下洗气流高精度测量的超声波风速计阵列,由于超声波风速计价格昂贵,且体积大,导致下洗气流场测量的空间分辨率较低,无法用于体积相对小巧的多旋翼无人机下洗气流场的精准检测。李继宇等^[16]设计开发了无人直升机风场无线传感器网络测量系统,分别建立了水稻冠层处X、Y、Z 3个方向的风场模型。基于该系统,汪沛等^[17]测量了水平冠层区域风向、风速和风场宽度,发现平行于直升机飞行航线的风力最大,有助于更远地传播花粉;李继宇等^[2]还分析了飞行高度、飞行速度和负载质量对旋翼风场分布的影响,采用正交试验方法对电动无人直升机和多旋翼电动无人机辅助水稻授粉作业参数进行了最优化选择。陈盛德等^[18]分析了旋翼下方X、Y、Z 3个方向的风场对雾滴沉积分布的影响,结果表明垂直地面方向风场对有效喷幅区域内雾滴沉积穿透性影响显著。

本文以六旋翼植保无人机为研究对象,基于格子玻尔兹曼数值模拟方法建立无人机前飞时多特征参数融合下旋翼风场的仿真模型并进行迭代计算,研究分析不同飞行高度、飞行速度、侧风风速和作业载荷对风场竖直分布规律的影响,构建旋翼风场竖直向下最大风速的回归模型;此外,基于微型无线风速采集系统开展植保无人机竖直方向气流速度的多参数田间验证试验。

1 材料与方法

1.1 模拟仿真及飞行参数设置

本文以M600六旋翼植保无人机为研究对象,无人机轴距1.13 m且相邻机臂夹角为60°,最大药液容量为5 L。植保无人机旋翼是核心旋转部件,直接影响旋翼风场的时空分布,因此,采用三维光学扫描技术,逆向精准构建无人机正、反旋翼的三维模型用于数值模拟,并将无人机简化模型导入基于格子玻尔兹曼方法的XFlow软件中,建立不同工况下旋翼风场的三维仿真模型(图1),并对全部模型进行迭代计算。

模拟仿真中,计算域为长方体,Z、X、Y轴尺寸为32 m×12 m×5 m,旋翼无人机在初始时刻位于坐标原点(无人机中心和坐标原点重合),无人机沿Z轴正方向直线飞行。计算域地面为固定壁面,采用加强壁面函数;平面abcd为侧风入口,平面efgh为侧风出口,考虑Y轴方向重力加速度,重力加速度设置为 -9.8 m/s^2 。本研究中计算域全局空间离散分辨率设置为0.2 m,机架和机臂的分辨率设置为

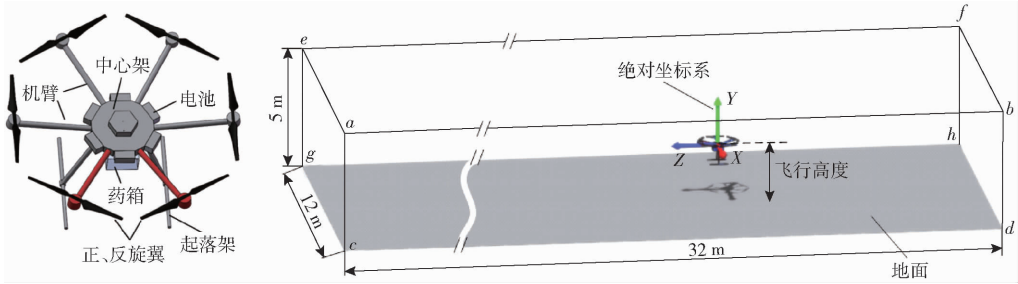


图 1 植保无人机模型及模拟仿真计算域示意图

Fig.1 Schematic of plant protection UAV and simulation calculation domain

0.1 m;对 6 个旋翼进行细化,分辨率设置为 0.025 m;气流尾迹的分辨率设置为 0.012 5 m,为了减少计算量和降低时间成本,将尾迹细化距离控制在无人机正后方 4 m 范围内。各个仿真工况的分辨率设置相同,共有 307 312 个正方体网格。

植保无人机作业过程中,影响旋翼风场空间分布规律的因素包括无人机飞行速度、飞行高度、自然侧风速等,因此,根据已有的研究分析和实际作业经验,假设作物冠层高度为 1 m,仿真模拟中分别设置飞行高度为 1.5、2.0、2.5、3.0 m;飞行速度为 1、2、3、4 m/s;自然侧风为 0、1、2、3 m/s;作业载荷划分为 1、3、5L。由于试验因素较多,因此,采用正交试验方法对飞行高度、飞行速度、自然侧风风速和作业载荷等 4 个主要因素进行了多水平考察,重点研究多特征参数融合下旋翼风场下洗气流在作物冠层的分布规律。不考察因素间的相互作用,正交试验设计如表 1 所示。

表 1 正交试验设计方案

Tab.1 Scheme of orthogonal experimental design

试验 编号	飞行高度/ m	飞行速度/ (m·s ⁻¹)	侧风风速/ (m·s ⁻¹)	作业载荷/ L
1	1.5	1	0	1
2	1.5	2	1	3
3	1.5	3	2	5
4	1.5	4	3	3
5	2.0	1	1	5
6	2.0	2	0	3
7	2.0	3	3	1
8	2.0	4	2	3
9	2.5	1	2	3
10	2.5	2	3	5
11	2.5	3	0	3
12	2.5	4	1	1
13	3.0	1	3	3
14	3.0	2	2	1
15	3.0	3	1	3
16	3.0	4	0	5

模拟仿真中,植保无人机先悬停一定时间,待旋翼风场和地面充分接触后,无人机以一定速度向前

飞行 4 s。观察无人机在不同高度悬停时下洗气流的时空演变规律,计算下洗气流充分发展至地面的时间。根据 1.5、2.0、2.5、3.0 m 4 个飞行高度的不同,分别设置悬停时间为 0.5、0.67、0.83、1 s。

1.2 微型无线风速采集系统设计

风速采集装置对风场稳定性和均匀性有一定影响,为提高风速测量的准确性,无人机旋翼风场测量采用小体积且灵活布置的微型风速采集系统,如图 2 所示,该系统基于 WiFi 无线通信模式,主要由 TCP 客户端即微型风速采集节点、中继路由器和 TCP 服务器组成。其中,微型风速采集节点由风速采集模块、无线通信模块、电源模块等组成。风速传感器敏感元件采用恒温型热敏芯片,芯片整体尺寸为 6.9 mm×2.4 mm×0.2 mm。热敏芯片集成了两个铂电阻温度传感器 RH 和 RS,与风速采集电路板上的部分元件共同构成惠斯通电桥以实现恒温效果,从而反映环境风速^[19-20]。风速传感器风速测量范围 0.1~30 m/s,采样间隔为 0.05 s,测量精度为 3%。无线通信模块核心处理器 ESP-12F 支持完整的 TCP/IP 协议栈,工作频段为 2.4 GHz,传输距离为 100 m。此外,采用 SolidWorks 2013 对风速采集节点整体结构进行了设计并制作,节点外形尺寸为 30 mm×20 mm×35 mm;通过在外壳两侧侧壁设计圆柱通孔辅助固定风速采集节点,圆柱孔直径 1 mm,以减少传感器固定支架对风场分布的干扰。

微型风速采集节点通过 WiFi 通信方式将风速数据传输至服务器,ESP-12F 模块在 STATION 模式建立 TCP Client 与服务器连接通信,基于中继路由器建立局域网,实现 TCPClient 客户端和服务器的实时数据交换。风速采集服务器可实现 20 路数据的同步采集,采样间隔为 0.02 s;服务器启动后自动查询当前 IP 地址,当客户端与服务器建立连接后,完成对各节点数据的采集、解析与处理,并实时显示在软件界面上。

2 模拟仿真与田间试验

植保无人机作业中旋翼风场在时间、空间和风

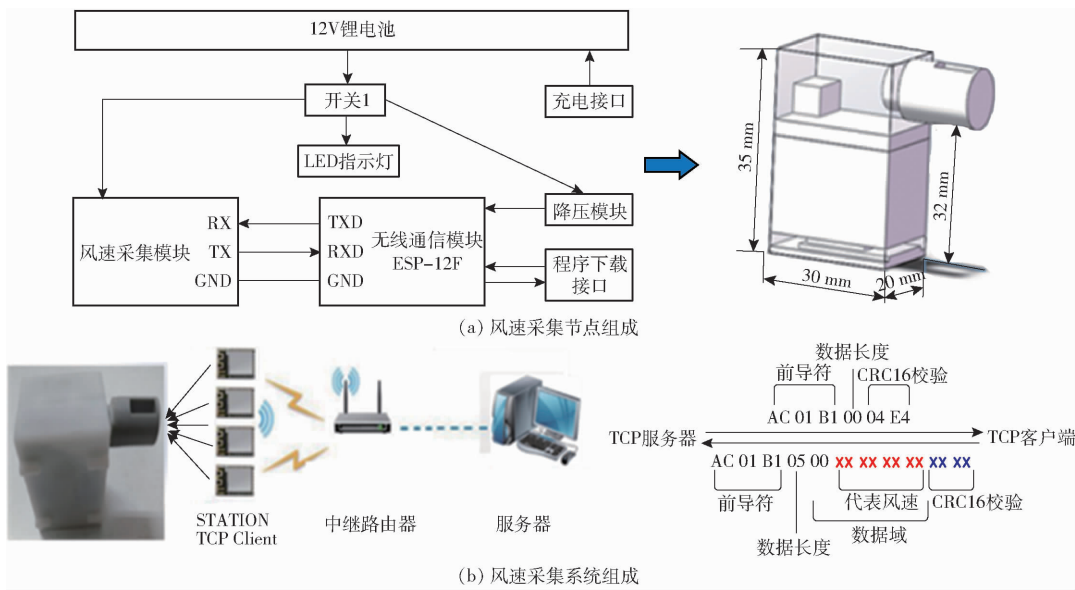


图 2 微型无线风速采集系统

Fig.2 Micro wireless wind speed acquisition system

速 3 个维度上都是变化的,根据末速度原则,旋翼气流到达作物冠层上方位置时,气流末速度携带雾滴穿透作物冠层,使雾滴均匀沉积在冠层上、中、下 3 个部位,因此,本研究中假设作物冠层高度为 1 m,以旋翼风场竖直分布在作物冠层位置处的风速 v_y 来表征旋翼风场下洗气流对雾滴产生的挟带输运效应,研究不同工况下旋翼风场的竖直分布规律及其影响因素。

2.1 风速采集节点试验与分析

为验证风速传感器的测量准确性,在小型低

速风洞环境下进行风速传感器的标定试验。将微型风速采集节点固定于风洞试验段,通过调节变频器改变风洞风速。对 20 个微型风速采集节点进行了测量,连续采集 20 s,每 1 s 采集 3 条数据,取其平均值作为标定值。以风速采集节点 C_3 为例,风速采集节点平均风速为横坐标,小型低速风洞试验段风速为纵坐标,采用分段拟合方法获得微型风速采集节点的标定曲线如图 3 所示。拟合方程的调整后 R^2 均大于 0.99。

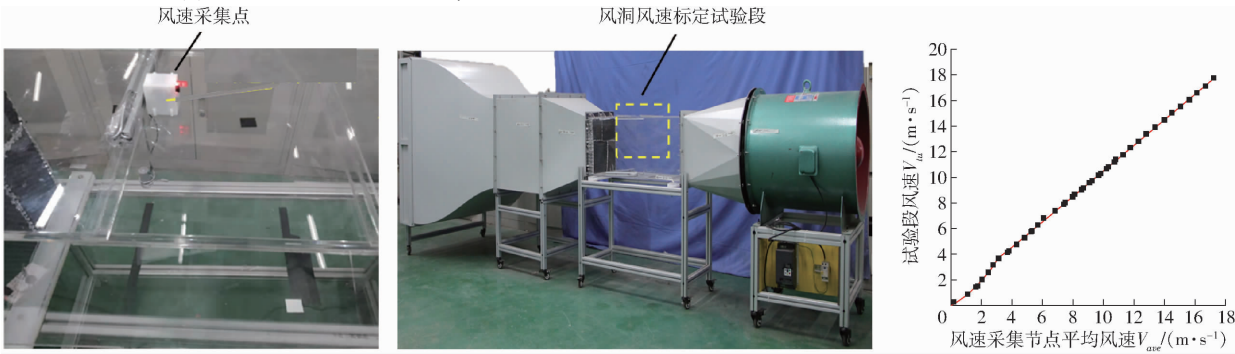


图 3 小型风洞环境下微型风速采集节点标定试验及测试曲线

Fig.3 Calibration test and curve of micro-wind speed acquisition node in wind tunnel environment

$$V_{tu} = \begin{cases} 0.7782V_{ave} - 0.11351V_{ave}^2 + 0.09728V_{ave}^3 & (0 \leq V_{ave} \leq 2.9 \text{ m/s}) \\ -0.22077 + 1.40461V_{ave} - 0.03831V_{ave}^2 + 0.00123V_{ave}^3 & (V_{ave} > 2.9 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 V_{ave} ——风速平均值, m/s
 V_{tu} ——风洞试验段风速, m/s

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 飞行高度和速度对风场竖直分布规律的影响

在 XFlow 仿真后处理中,垂直于无人机飞行航线,距离地面 1 m 高度处沿 X 轴方向布置 41 个传感器。其中,传感器线阵位于飞行全程的中间位置,试

验中采集包含无人机飞越传感器线阵前、中、后整个连续作业时间段的风速。将采集的仿真数据导入 Origin 2018 中,绘制不同飞行高度和速度时距离地面 1 m 高度处风场竖直分布的三维曲面模型,如图 4 所示,图中 v_y 为负值表示竖直向下的风速分量, v_y 为正值表示竖直向上的风速分量。同一飞行速度时,随着飞行高度的增加,风场强度逐渐减小;且距

离地面 1 m 高度处风场最大风速在飞行速度 1、2、3、4 m/s 时的衰减率分别为 31.2%、26.4%、43.6%、64.8%。同一飞行高度时,随着飞行速度的

增加,风场强度随之减小;且距离地面 1 m 高度处风场最大风速在飞行高度为 1.5、2.0、2.5、3.0 m 时的衰减率分别为 3.6%、14.0%、24.3%、50.7%。

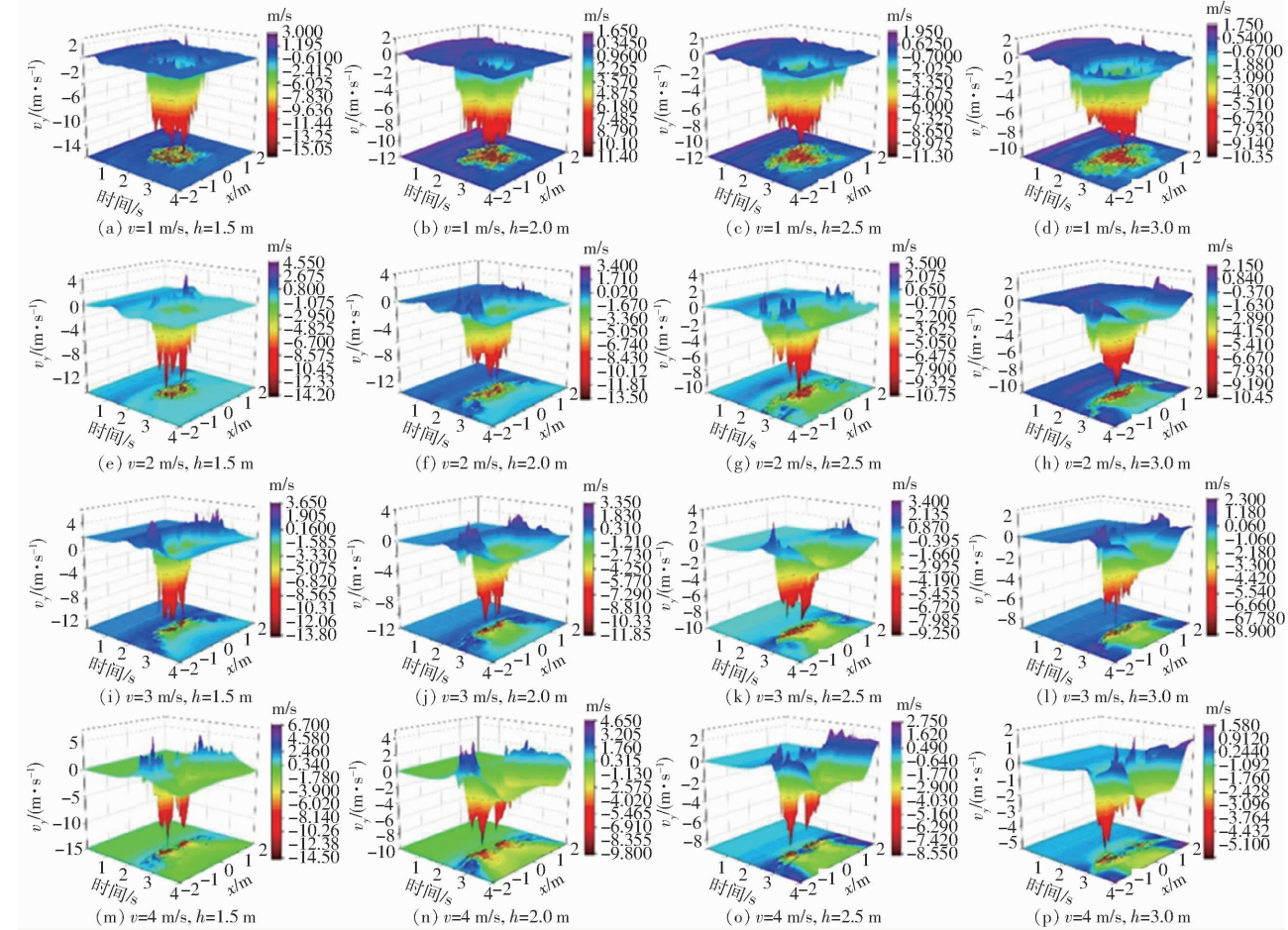


图4 不同飞行高度和速度时距地面 1 m 高度处竖直分布风场三维曲面模型
Fig.4 Three-dimensional surface model of vertical distribution wind field at height of 1 m above ground at different flight heights and speeds

2.2.2 自然侧风和作业载荷对风场竖直分布规律的影响

以飞行高度 2 m 及飞行速度 4 m/s 为例,距离地面 1 m 高度处,自然侧风对旋翼风场竖直分布规律的影响如图 5 所示。侧风风速为 0 m/s 时,距离地面 1 m 高度处风场竖直分布基于 X 轴上下对称分布;当侧风存在时,竖直分布风场沿侧风方向倾斜,且随着侧风风速增加,倾斜角度逐渐增大,当侧风风速为 3 m/s 时,风场产生约 45° 的倾斜。图中蓝色和深蓝色区域表示 v_y 是正值,即竖直向上的 Y 向风场。当侧风从 0 m/s 增大到 3 m/s 时,迎风侧蓝色区域面积逐渐增大,可能是侧风气流与前飞时旋翼风场发生碰撞挤压等相互作用,增强了气流上升运动的趋势,从而引起冠层扰动和叶片翻转,增加雾滴在冠层背面的沉积量。

图 6 为植保无人机飞行状态下无人机作业载荷分别为 1、3、5 L 时竖直分布风场速度分布曲线,图中 X 轴数值越大表示距离旋翼底部越远越接近地

面, v_y 为负值表示风速方向竖直向下。由图 6 可知, 3 条速度分布曲线的变化趋势基本一致, 大约从 0 m/s 上升至 2 m/s, 再下降到最小值, 随后继续上升, 在距离旋翼底部大约 0.8 m 位置处上升到 0 m/s 左右, 之后速度大小几乎没有变化。3 条速度分布曲线的最低点不同, 分别为 (0.25, -9.6)、(0.31, -12.7) 和 (0.41, -15.1), 即载荷越大, 最低点越低 (竖直向下的风速值越大), 最低点发生的位置也越远离旋翼底部。载荷从 5 L 变化到 1 L, Y 向风场最大风速从 15.1 m/s 减少到 9.6 m/s, 衰减率为 36.5%, 且最大风速发生的位置上移了 16 cm。

2.2.3 竖直分布风场最大风速回归模型

使用 SPSS Statistics 进行多因素回归分析, 竖直向下最大风速与飞行高度、飞行速度、侧风风速、作业载荷的回归方程为

$$v_{y-\max} = 19.693 - 3.715h - 0.69v + 0.325v_c + 0.441l_d \quad (2)$$

式中 h ——飞行高度, m

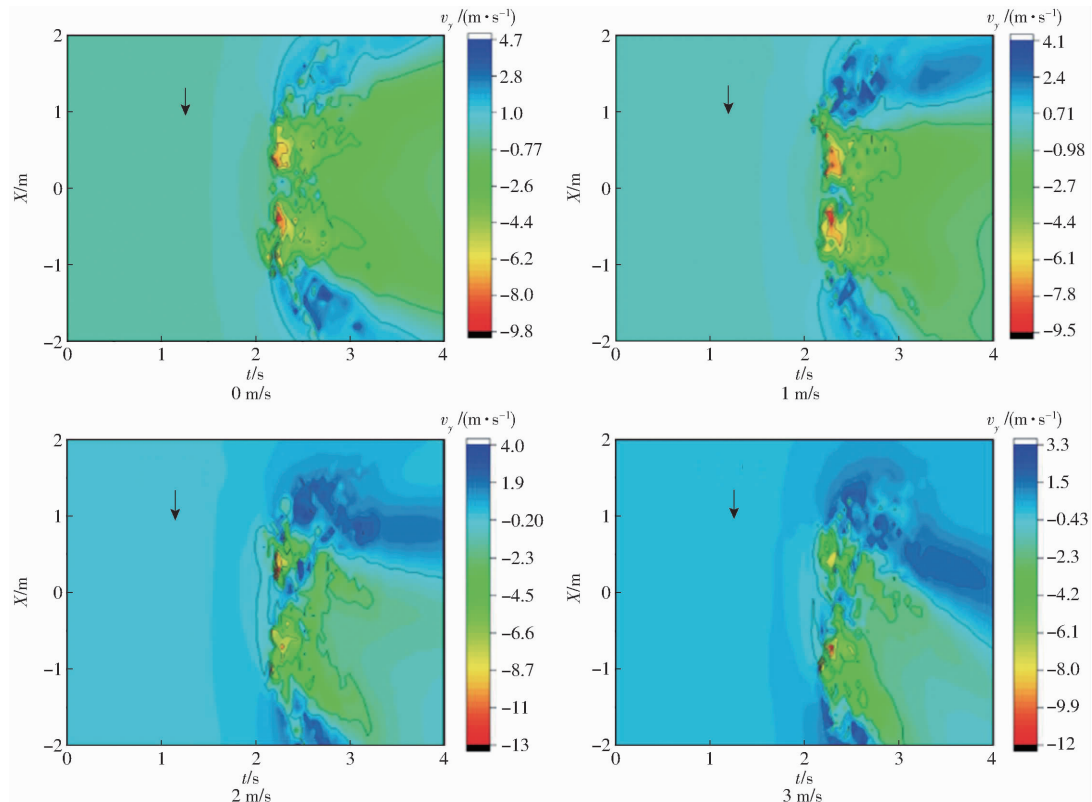


图5 不同侧风风速时距离地面1 m高度处旋翼风场二维模型

Fig.5 Two-dimensional model of wind field at height of 1 m above ground at different crosswind speeds

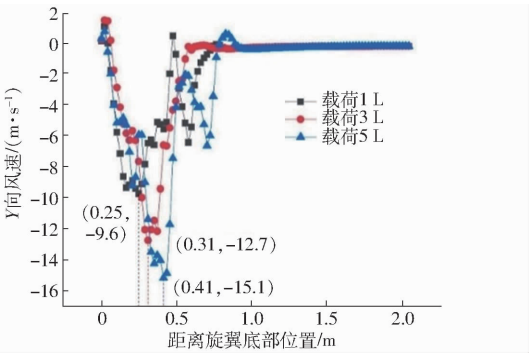


图6 不同作业载荷下竖直分布风场风速曲线

Fig.6 Wind speed curves of vertical distribution wind field under different operating loads

- v ——飞行速度, m/s
- v_c ——侧风风速, m/s
- l_d ——作业载荷, L
- $v_{y-\max}$ ——竖直向下最大风速, m/s

如表2所示,由多因素主体间效应的检验结果可知,飞行高度的显著性系数为0,飞行速度的显著性系数为0.022,侧风风速的显著性系数为0.237,作业载荷的显著性系数为0.055。飞行高度对Y向风场最大风速的影响为极显著,飞行速度和作业载荷的显著性系数均小于0.1,表明飞行速度和作业载荷对竖直向下最大风速有显著影响。对竖直向下最大风速值的影响主次顺序为:飞行高度、飞行速度、作业载荷、侧风风速。

表2 竖直向下最大风速回归模型系数

Tab.2 Maximum vertical downward wind speed regression model coefficient

参数	系数	标准差	<i>t</i>	<i>p</i>	容差
常量	19.693	1.552	12.688	0	
<i>h</i>	-3.715	0.520	-7.143	0	1.000
<i>v</i>	-0.690	0.260	-2.653	0.022	1.000
<i>v_c</i>	0.325	0.260	1.250	0.237	1.000
<i>l_d</i>	0.441	0.206	2.143	0.055	1.000

回归模型调整后 R^2 为 0.801, F 为 16.056, 模型显著性系数小于 0.001; 残差服从正态分布, 模型拟合效果较好(图7)。

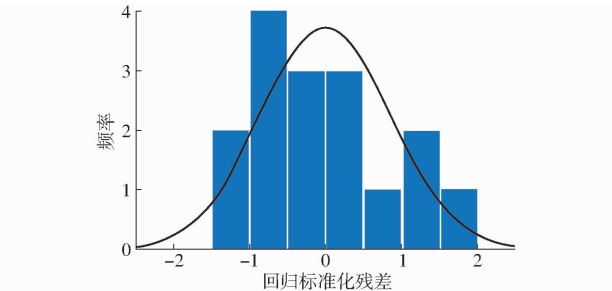


图7 回归模型标准化残差分析

Fig.7 Standardized residual analysis of regression models

2.3 田间试验

田间试验在中国农业大学涿州教学实验场进行,试验场景布置如图8所示,11个微型无线风速采集节点(编号分别为 $S_1 \sim S_{11}$)采用线阵方式布置

于农田中,相邻采集节点间距 0.4 m,采集节点距离地面高度为 1 m。无人机飞行航线和传感器线阵相互垂直,且风速采集节点关于飞行航线对称布置,采集节点 S_6 位于飞行航线正下方。试验中,环境温度为 25°左右,西南阵风,风速为 0 ~ 1.8 m/s。

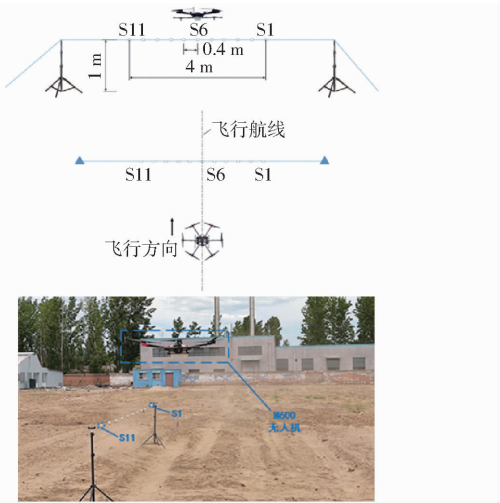


图 8 旋翼风场竖直分布田间试验

Fig. 8 Field test of vertical distribution of rotor wind field

田间试验中无人机药箱载荷为 3 L,无人机试验方案如表 3 所示,每组试验均有相同工况参数的仿真模型与之对应。每次试验中植保无人机按照相同飞行航线重复飞行 2 次,即重复采样 2 次。TANG 等^[10]研究发现,前飞试验中,无人直升机飞越传感器线阵前 1 s 内的下洗速度可以忽略不计。为了避免无人机飞越传感器线阵前的风速数据过多引起 Y 向风速平均值整体变小,选择无人机飞越传感器线阵前 1 s 内和飞越传感器线阵后 2 s 内,一共采集连续 3 s 时间段内的数据。

与试验的布置相同,在仿真后处理中使用距离地面 1 m 高度的传感器线阵(使用 11 个传感器,相邻传感器间隔 0.4 m)采集无人机飞越传感器线阵前后共 3 s 时间段内的风场风速。不同作业工况

表 3 田间试验方案

Tab. 3 Program design of field trial

试验编号	飞行高度/m	飞行速度/(m·s ⁻¹)
1	2.0	1
2	2.0	2
3	2.0	3
4	2.0	4
5	3.0	1
6	3.0	2
7	3.0	3
8	3.0	4
9	2.5	4

下,距离地面 1 m 高度处风速随传感器位置的变化规律如图 9 所示。由图可知,不同作业工况下,仿真与试验曲线沿 X 轴的变化趋势相似:无人机在高度 2.0 m 处以速度 1 m/s 飞行,沿 X 轴从左至右观察,风速 v_y 先下降,下降至最低点后又开始上升,风速变化曲线呈 V 形。无人机在高度 2.5 m 处以速度 4 m/s 飞行时,风速变化曲线呈 W 形。由于田间试验中环境风场及无人机航线与预定航线有偏离,仿真曲线和试验曲线的波峰、波谷存在错位。

分别定义 q_s 和 q_e 为田间试验和仿真试验中各传感器采集数据的平均值,仿真与田间试验数据相对误差 e 为

$$e = \frac{q_e - q_s}{q_s}$$

(3)

不同作业工况下,11 个采样点试验和仿真数据的相对误差如表 4 所示,在采样点 S_5 处相对误差最大为 2.53,由图 9 中可以发现,由于无人机飞行航线误差或环境侧风导致试验曲线和仿真曲线存在错位,采样点 S_5 为曲线的波峰位置,因此造成该采集位置处相对误差较大。此外,当飞行高度和飞行速度较低时,远离无人机飞行航线的采样位置处如试验 1 和试验 5 的 S_1 、 S_2 、 S_{10} 和 S_{11} 位置处,试验与仿真数据相对误差较大,其主要受地面效应或涡流影响

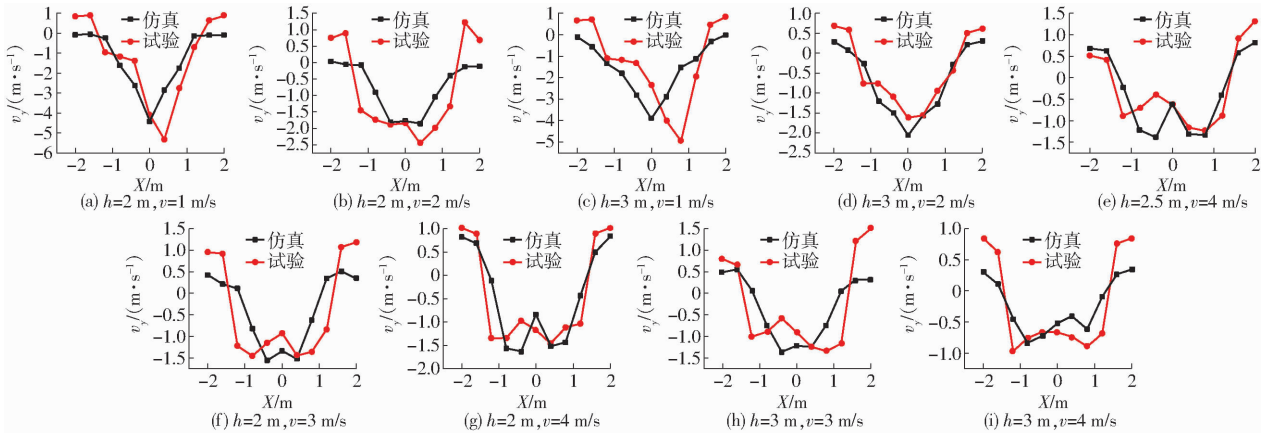


图 9 不同作业工况下仿真与田间试验风场竖直分布风速变化曲线

Fig. 9 Variation curves of vertical distribution wind speed in simulation and field test under different operation conditions

所致。整体来看,田间试验与仿真试验数据变化趋势相近,相对误差较小。

表 4 不同作业工况下仿真与田间试验数据相对误差

Tab.4 Relative errors of simulation and field test data under different operating conditions

试验 序号	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}
1	1.09	1.06	0.75	0.39	0.88	0.08	0.47	0.36	0.80	1.15	1.14
2	0.95	1.06	0.94	0.48	0.04	0.03	0.24	0.47	0.70	1.10	1.17
3	0.56	0.77	1.09	0.44	0.36	0.44	0.06	0.54	1.41	0.52	0.71
4	0.19	0.23	0.92	0.16	0.68	0.28	0.04	0.30	0.59	0.45	0.17
5	1.15	1.77	0.23	0.51	1.13	0.68	0.28	0.69	0.41	1.61	1.01
6	0.58	0.90	0.66	0.59	0.36	0.28	0.02	0.36	0.34	0.56	0.51
7	0.38	0.15	1.06	0.17	1.29	0.36	0.01	0.44	1.04	0.73	0.78
8	0.65	0.83	0.53	0.10	0.10	0.22	0.45	0.30	0.87	0.65	0.60
9	0.33	0.47	0.75	0.74	2.53	0.07	0.13	0.09	0.54	0.35	0.38

3 结 论

(1)建立了六旋翼植保无人机前飞时旋翼风场仿真模型,采用正交试验方法研究了多特征参数融合对竖直分布风场变化规律和风场强度的影响,并构建了旋翼风场竖直分布最大风速的回归模型。仿真结果表明:竖直分布风场沿 X 轴对称分布,且随着飞行高度和飞行速度增加,风场强度逐渐变小;在飞行速度 1、2、3、4 m/s 时,距离地面 1 m 高度处风场最大风速的衰减率分别为 31.2%、26.4%、43.6%、64.8%;在飞行高度 1.5、2.0、2.5、3.0 m

时,风场最大风速的衰减率分别为 3.6%、14.0%、24.3%、50.7%。植保无人机作业载荷减少时,风场最大风速从 15.1 m/s 减小到 9.6 m/s,最大风速在作物冠层的作用位置上移 16 cm。最大风速与多特征参数间回归模型决定系数 R^2 为 0.801,回归分析表明飞行高度是影响竖直分布风场最大风速的极显著因素,飞行速度和作业载荷对最大风速影响显著,模型对实际作业有实际的参考意义。

(2)研制了小体积且可灵活布置的微型无线风速采集系统,通过 WiFi 局域网实现微型风速采集节点和服务器的无线数据传输,减少人为操作和节点尺寸对风场稳定性和测量准确性的干扰。风速采集节点以恒温差热敏芯片感应风速变化,节点尺寸为 37 mm×27 mm×33 mm,风速测量范围 0~30 m/s;使用小型风洞对风速采集节点进行标定,标定曲线的拟合度决定系数均在 99% 以上。

(3)采用微型无线风速采集系统开展了旋翼风场竖直分布田间试验,结果表明:仿真模拟与田间试验旋翼风场竖直分布风速的变化趋势和分布规律基本一致,相对误差较小,数值模拟结果准确;但由于田间作业环境的不可控,飞行航线偏差及地面效应等造成部分数据相对误差较大。整体而言,基于格子玻尔兹曼的数值模拟方法可有效模拟植保无人机飞行过程中的非定常流动,为植保无人机田间试验提供理论支撑和数据基础。

参 考 文 献

[1] CHEN H B, LAN Y B, FRITZ B K, et al. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 38–49.

[2] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 104–118.

LI Jiyu, LAN Yubin, SHI Yeyin. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 104–118. (in Chinese)

[3] 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. Effect of plant protection UAVs downwash on crop canopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 40–48. (in Chinese)

[4] YANG F B, XUE X Y, ZHANG L, et al. Numerical simulation and experimental verification on downwash air flow of six-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hover[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4): 41–53.

[5] ZHANG S C, XUE X Y, SUN Z, et al. Downwash distribution of single-rotor unmanned agricultural helicopter on hovering state[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(5): 14–24.

[6] GUO Q W, ZHU Y Z, TANG Y, et al. CFD simulation and experimental verification of the spatial and temporal distributions of the downwash airflow of a quad-rotor agricultural UAV in hover[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105343.

[7] 张豪, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 基于 Porous 模型的多旋翼植保无人机下洗气流分布研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 112–122.

ZHANG Hao, QI Lijun, WU Yalei, et al. Spatio-temporal distribution of down-wash airflow for multi-rotor plant protection UAV based on Porous model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 112–122. (in Chinese)

[8] ZHANG H, QI L J, WU Y L, et al. Numerical simulation of airflow field from a six-rotor plant protection drone using lattice Boltzmann method[J]. Biosystems Engineering, 2020, 197: 336–351.

[9] TANG Q, ZHANG R R, CHEN L P, et al. Droplets movement and deposition of an eight-rotor agricultural UAV in downwash flow field[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 47–56.

[10] TANG Q, CHEN L P, ZHANG R R, et al. Effects of application height and crosswind on the crop spraying performance of

unmanned helicopters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105961.

[11] 文晟, 韩杰, 兰玉彬, 等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 127–137. WEN Sheng, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Influence of wing tip vortex on drift of singlerotor plant protection unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 127–137. (in Chinese)

[12] PARRA H G, MORALES V D, GARCIA E E. Multiphase CFD simulation of photogrammetry 3D model for UAV crop spraying [C]//World Conference on Information Systems and Technologies, Springer, Cham., 2019: 812–822.

[13] YANG S H, TANG Q, ZHENG Y J, et al. Model migration for CFD and verification of a six-rotor UAV downwash[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 10–18.

[14] WU Y L, QI L J, ZHANG H, et al. Design of UAV downwash airflow field detection system based on strain effect principle [J]. Sensors, 2019, 19(11): 2630.

[15] TANG Q, ZHANG R R, DING C C, et al. Application of ultrasonic anemometer array to field measurements of the downwash flow of an agricultural unmanned helicopter[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(5): 1219–1230.

[16] 李继宇, 周志艳, 兰玉彬, 等. 旋翼无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 77–86. LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, LAN Yubin, et al. Distribution of canopy wind field produced by rotor unmanned aerial vehicle pollination operation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 77–86. (in Chinese)

[17] 汪沛, 胡炼, 周志艳, 等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 54–61. WANG Pei, HU Lian, ZHOU Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 54–61. (in Chinese)

[18] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105–113. CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105–113. (in Chinese)

[19] 叶一舟. 高性能硅基 MEMS 热式风速传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. YE Yizhou. Investigation on the high-performance silicon-based mems thermal wind sensors [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)

[20] 苏玲. 低功耗 MEMS 热式风速传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2016. SU Ling. Research of low-power MEMS thermal wind sensor[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)

(上接第 10 页)

[19] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1–16. XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research process on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1–16. (in Chinese)

[20] 倪长安, 徐云云, 庞奇, 等. 通用型离心风机叶片数量对性能的影响规律[J]. 农业机械, 2009(14): 86–88.

[21] 邵卫, 李意民, 贾利红. 离心风机内部流场模拟[J]. 煤矿机械, 2006, 27(7): 47–49. SHAO Wei, LI Yimin, JIA Lihong. Numerical simulation of internal flow in centrifugal fan[J]. Coal Mine Machinery, 2006, 27(7): 47–49. (in Chinese)

[22] 王晗昊, 李耀明, 徐立章, 等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 84–92. WANG Hanhao, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 84–92. (in Chinese)

[23] 夏利利, 金玉良, 李耀明, 等. 联合收割机清选室空间气流场的实验研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(11): 188–190. XIA Lili, JIN Yuliang, LI Yaoming, et al. Experimental study of air flow field of air-and-screen cleaning[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(11): 188–190. (in Chinese)

[24] 李洋, 徐立章, 周莹, 等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 48–55. LI Yang, XU Lizhang, ZHOU Ying, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 48–55. (in Chinese)

[25] 刘鹏, 金诚谦, 刘政, 等. 大豆联合收获机田间清选作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 35–45. LIU Peng, JIN Chengqian, LIU Zheng, et al. Optimization of field cleaning parameters of soybean combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 35–45. (in Chinese)

[26] 吴崇友, 丁卫民, 张敏, 等. 油菜分段收获脱粒清选试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 70–76. WU Chongyou, DING Weimin, ZHANG Min, et al. Experiment on threshing and cleaning in two-stage harvesting for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 70–76. (in Chinese)

[27] 侯华铭, 崔清亮, 郭玉明, 等. 气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 43–49. HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Design and test of air-sweeping suspension velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 43–49. (in Chinese)

[28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 牧草种子悬浮速度测定方法: JB/T 7290—2007[S]. 北京: 中国机械工业出版社, 2008.

[29] 陈杰. MATLAB 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.