

油菜成条飞播装置设计与试验

黄小毛^{1,2}, 徐胡伟¹, 张 顺¹, 李文成^{1,2}, 罗承铭^{1,2}, 邓宇飞¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 为解决常见地面播种机器无法进入或进入经济效益不高场景下的油菜播种问题, 基于极飞 P20 商用植保无人机平台, 设计一种基于电驱离心条播式排种器的无人机油菜飞播装置, 以实现类似地面机器条播而非撒播的效果。首先对已有倒置锥筒离心式排种器进行改进, 设计上凸锥筒离心式排种器结构, 并确定排种盘和排种口等关键部件的结构参数。在分析该款无人机下洗气流场分布规律的基础上, 提出了一种与该离心排种器配合使用的辅助导种装置。排种性能台架试验表明, 当排种转速在 40~220 r/min 范围逐渐增加时, 单位时间总排量呈现先持续增加后趋于稳定, 且在排种转速为 190 r/min 时达到最大单位时间总排量 179.65 g/min, 可满足无人机作业速度 5 m/s 所需的排量要求; 各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数先减小后增大, 分别分布在 4.5%~12.6%和 0.7%~6.2%范围内; 种子籽粒破损率随排种转速增大逐渐增大, 但均在 2%以内。样机场地测试试验表明, 导种装置高度在 1.5~2.5 m 范围内变化时, 成条指数与其没有显著相关性 ($P=0.0769>0.05$), 且成条宽度不到设定行距的 1/4。进一步的田间试验结果显示, 成条指数为 35.0%, 播种均匀性变异系数为 19.26%, 满足油菜条播农艺技术要求。

关键词: 无人机; 设计; 油菜飞播; 离心式排种器; 旋翼气流抗干扰技术

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.009

中图分类号: S251

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0078-10

黄小毛, 徐胡伟, 张 顺, 李文成, 罗承铭, 邓宇飞. 油菜成条飞播装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 78—87. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.009 http://www.tcsae.org

Huang Xiaomao, Xu Huwei, Zhang Shun, Li Wencheng, Luo Chengming, Deng Yufei. Design and experiment of a device for rapeseed strip aerial seeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 78—87. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.009 http://www.tcsae.org

0 引 言

油菜是中国分布区域最广、播种面积最大的油料作物, 因其对土壤和热量要求不高, 具有广适性^[1]。油菜播种因区域不同对机具的选择也需因地制宜。据统计, 中国南方地区河滩、坡地总面积达 240 万 hm^2 ^[2]; 冬闲田面积约 650 万 hm^2 ^[3], 这些区域是种植油菜作物的潜在耕地资源, 但常见地面播种机器往往因为适应性问题无法进入或进入经济效益不高。长期以来, 油菜作为油料作物时往往与其他作物连作种植, 播种时间短, 对机具的作业效率要求高, 南方水田土壤黏重、地块面积狭小分散, 大型地面播种机械难以行走, 因此主要依靠人工撒播和移栽或小型播种机作业, 耗工费时, 成本较大^[4-7]。

配备高精度自主飞行功能的无人机, 具有地面机器无法比拟的高通过性、稳定性和作业效率等特点^[8]。无人机体型小, 操控灵活, 可以实现航迹规划和自动导航飞行, 能在地面机械难以进入的场所进行作业^[9]。随着技术的进步, 无人机已可达到 12 m/s 的飞行速度, 该速度是常规地面机器作业速度的 3~5 倍, 且具有大范围实时可

调的特点。因此, 利用无人机飞播技术可有效解决部分地区的油菜机械化播种问题。

国内外已有关于无人机播种的研究报道^[10-11], 广州极飞科技、深圳大疆创新和珠海羽人等无人机生产企业已陆续开发出播种无人机, 并进行了示范推广, 证明了无人机播种的可行性和实用性。相关学者也对无人机播种技术进行了研究, Li 等^[12]设计了一种水平离心圆盘式水稻撒播装置, 并进行了田间试验。宋灿灿等^[13]设计了一种气力式无人机水稻撒播装置, 该装置利用排种槽轮控制稻种排量, 利用风机产生的高速气流吹送稻种。陈雄飞等^[14]设计的离心摆管式播种无人机, 离心摆管绕着固定的旋转中心旋转使物料颗粒进入摆管, 再在离心力的作用下从摆管末端抛撒出去。沿前进方向上的落种区是较多环形落种带叠加形成的, 存在较多重播和漏播, 因此此类播种无人机通常只适用于飞播造林和飞播牧草等均匀性要求不高的领域。李遗^[15]设计的适用于超低空飞行器的肥料撒播装置, 采用离心圆盘式排肥器半边抛撒, 落种带呈扇形环状。包胜军等^[16]设计的无人机撒播装置利用闸门的移动控制出料口大小, 调节播量, 对闸门的控制精度要求较高, 排量均匀性难以保证。Erico^[17]尝试一种基于螺旋送料器的树种飞播装置, 用于飞播造林。上述飞播装置, 大多利用水平离心圆盘或外槽轮等核心器件对种子、化肥等物料向空中进行抛撒作业。由于投种高度较大且受无人机旋翼气流的扰动, 种子籽粒落点位置随机性较大, 一般整体上成面散点状分布。已

收稿日期: 2019-11-13 修订日期: 2020-02-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31771683), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2662018PY08), 湖北省自然科学基金项目 (2019CFB752)。

作者简介: 黄小毛, 副教授, 主要从事现代农业装备设计与测控方面的研究。

Email: huangxiaomao@mail.hzau.edu.cn

有的无人机播种属于比较粗放的方式，播种效率高，但播种均匀性受因多种因素影响而不易控制。针对这一问题，该文结合油菜条播农艺技术要求，设计实现一种专用于油菜条播的无人机飞播装置。

1 飞播装置总体结构及工作原理

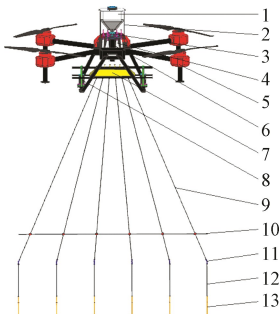
1.1 油菜条播农艺技术要求

油菜对播种期的反应非常敏感，对于长江中下游地区等冬油菜种植区而言，发芽适宜温度为 16~22℃，幼苗出叶温度为 10~15℃ 以上，一般要求在 9 月下旬到 10 月中旬播种，最迟不超过 10 月底^[18]。地面机具条播播量每亩控制在 150~250 g，随着播种期的推迟播量逐渐增加，9 月下旬播种一般为 150 g，10 月上旬播种一般为 200 g，10 月中旬播种一般为 250 g^[19-20]。油菜条播密度为 225 000~375 000 株/hm²，实际播种时株距、行距和播种深度分别控制在 0.04~0.07、0.20~0.4 和 0~0.02 m。

因飞播装置不与地面土壤产生接触，无法完成地面机具的开沟、覆土功能，因此为保证发芽率，油菜飞播时可采用 3 种模式：先地面机具旋耕并开沟后飞播，种子籽粒落入土壤颗粒间隙；先飞播后地面机具或人工开沟并利用开沟土壤进行种子籽粒覆土；加大播量纯飞播。本文田间试验时采用第一种模式。

1.2 飞播装置总体结构

飞播装置搭载于极飞 P20 型无人机上，主要由种箱、种箱支架和离心式排种器等组成，如图 1 所示。其中种箱支架和舵机分别通过螺栓与无人机机架固定连接。



1.种箱 2.种箱支架 3.离心式排种器 4.橡胶软管 5.无人机 6.排种电机 7.罩壳 8.舵机 9.导种管 10.水平固定杆 11.变向接口 12.投种管 13.硅胶尾管
1.Seed box 2.Seed box support 3.Centrifugal seed metering device 4.Rubber hose 5.Unmanned aerial vehicle 6. Seed metering motor 7.Cover 8.Steering motor 9.Seed guiding tube 10.Horizontal fixing rod 11.Direction changing interface 12.Seed dropping tube 13.Silica gel tail tube

图 1 飞播装置结构示意图

Fig.1 Structural diagram of aerial seeding device

1.3 工作原理

工作时，无人机以适当高度悬停在空中，位于排种器上部种箱中的油菜种子籽粒在重力作用下下落，经进种口均匀连续地流入排种器外壳与排种盘所夹的充种室中。挂接导种装置后解除无人机悬停指令，使其按照既定的轨迹实现自主飞行。同步启动排种电机，驱动排种盘匀速旋转，排种盘中的油菜种子籽粒在离心力和隔条的带动作用做匀速圆周运动，形成均匀规则的种子籽

粒旋转流动层。当流动层外缘种子籽粒与外壳内壁的型孔相遇时，种子籽粒被型孔囊入并排出，经过橡胶软管、罩壳、导种管、变向接口和投种管，最后从硅胶尾管中排出至地表，实现一器多行精量排种作业。

1.4 技术参数

根据飞行器的特点及油菜条播农艺技术要求，拟定飞播装置的主要技术参数如表 1。

表 1 飞播装置（含极飞 P20 型无人机）主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of aerial seeding device (including XAG P20 UAV)

参数 Parameters	值 Values
外形尺寸 Overall dimensions/(m×m×m)	1.5×1.5×2.45
作业行数 Number of working rows	6
作业幅宽 Working width/m	1.8
作业速度 Working speed/(m·s ⁻¹)	0~5
生产率 Productivity/(hm ² ·h ⁻¹)	0.648~3.24
作业飞行高度 Operational flight altitude/m	2~3.5
最大飞行速度 Maximum flight speed/(m·s ⁻¹)	12
种箱容积 Seed box volume/L	3.5
续航时间 Duration of voyage/min	20

2 关键部件设计

2.1 离心式排种器结构设计

排种器是飞播装置的核心工作部件，其性能直接影响到油菜飞播的作业质量和效率；搭载于地面机器上的离心式排种器体积大、排种效率低、对坡角比较敏感，难以满足无人机飞播装置高速条播的作业要求。本文将传统地面机器使用的倒置内锥筒型排种盘^[21]改进成上凸锥筒式，设计一种电驱、大排量的离心式油菜排种器，其结构如图 2 所示。该排种器依靠油菜种子籽粒重力和离心力双重作用充种，实现一器多行排种，不受机具振动和颠簸影响，具有比传统倒置内锥筒型（下凹）离心式排种器更好的充种效果和作业稳定性。

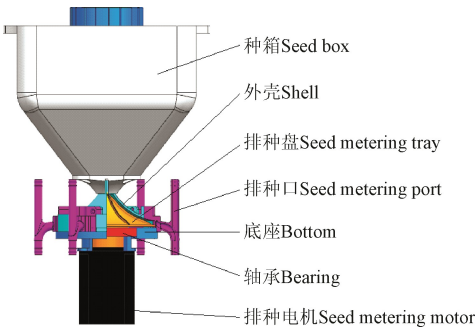


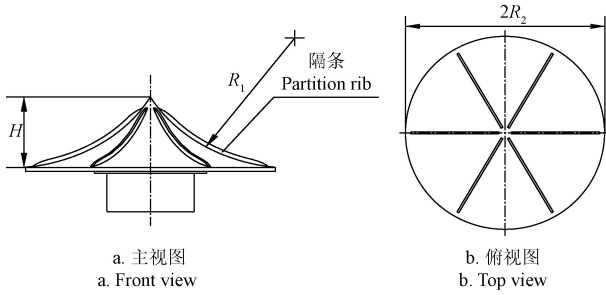
图 2 上凸锥筒离心式油菜排种器结构

Fig.2 Structure of centrifugal rapeseed metering device with upward cone

2.1.1 排种盘设计

针对传统离心式排种器倒置锥筒型排种盘^[5]可能导致的问题，本文改进后提出的离心式油菜排种器，其排种盘结构如图 3 所示。排种盘型面为向外发散的伞状，油菜种子籽粒自上而下靠自身重力、种群作用力和离心力进行充种、运种和排种。排种盘型面上设置 6 根均匀

分布的隔条,在排种电机驱动下,充种间隙中的种子籽粒在隔条的带动下随着排种盘匀速旋转,形成规则的种子籽粒旋转流动层。



注: R_1 为排种盘型面半径, mm; R_2 为排种盘半径, mm; H 为排种盘高度, mm, 下同。
Note: R_1 is the radius of seed metering tray surface, mm; R_2 is the radius of seed metering tray, mm; H is the height of seed metering tray, mm. Same as below.

图 3 排种盘结构示意图
Fig.3 Structural sketch of seed metering tray

种子籽粒进入排种盘与外壳间隙后,在隔条作用下获得与排种盘相同的回转速度,在排种盘型面中间任意位置 C 点处受到以下各力的作用(忽略种子籽粒之间的相互作用及垂直于纸面的隔条推力),如图 4 所示。

离心力、重力、排种盘反作用力、摩擦力分别为

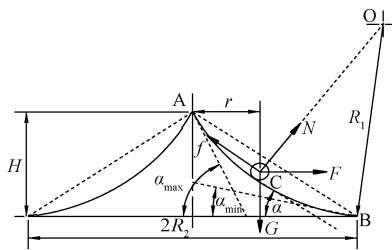
$$F = mr\omega^2 \quad (1)$$

$$G = mg \quad (2)$$

$$N = mg\cos\alpha - mr\omega^2\sin\alpha \quad (3)$$

$$f = N\tan\theta \quad (4)$$

式中 m 为种子籽粒质量, kg; ω 为排种盘角速度, rad/s; r 为种子籽粒中心位置到排种盘中心线的距离, m; α 为排种盘型面曲线 C 点处切线与水平面的夹角(简称切平角), ($^\circ$); θ 为摩擦角, ($^\circ$); g 为重力加速度, m/s^2 。



注: O 为排种盘型面圆心; A 为排种盘型面顶部; B 为排种盘型面底部; C 为油菜籽在排种盘中的位置; F 为离心力, N; G 为重力, N; N 为排种盘反作用力, N; f 为摩擦力, N; r 为油菜籽中心位置到排种盘中心线的距离, mm; α 为型面曲线 C 点处切线与水平面的夹角, ($^\circ$); α_{\max} 为最大切平角, ($^\circ$); α_{\min} 为最小切平角, ($^\circ$); θ 为摩擦角, ($^\circ$)。
Note: O is the center of seed metering tray surface; A is the top of the seed metering tray surface; B is the bottom of the seed metering tray surface; C is the position of rapeseed in the seed metering tray; F is centrifugal force, N; G is gravity, N; N is the reaction force of seed metering tray, N; f is friction, N; r is the distance from the center of rapeseed to the center line of seed metering tray, mm; α is the angle between the tangent line at point C of tray surface and the horizontal plane, ($^\circ$); α_{\max} is the maximum angle between tangent line and horizontal plane, ($^\circ$); α_{\min} is the minimum angle between tangent line and horizontal plane, ($^\circ$); θ is the friction angle, ($^\circ$)。

图 4 排种过程种子籽粒受力分析示意图

Fig.4 Force analysis diagram of rapeseed during seeding process

由力学分析可知,排种的必要条件为种子籽粒受到的摩擦力小于等于重力及离心力在切线方向上的分力之和,即

$$f \leq G\sin\alpha + F\cos\alpha \quad (5)$$

代入 F 、 G 和 f 并化简,得

$$r\omega^2 \geq g\tan(\theta - \alpha) \quad (6)$$

当 $r=0$ 时,即在顶点 A 处时, $\tan(\theta - \alpha) \leq 0$,也就是 A 点处的切平角 α_{\max} 大于摩擦角 θ ,即可满足种子籽粒从入口处顺利进入排种盘与外壳间的间隙。

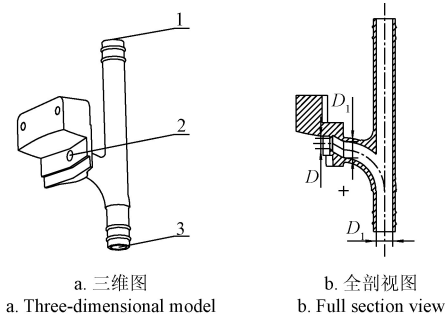
当 $r \neq 0$ 时,进一步有

$$\omega \geq \sqrt{\frac{g}{r}\tan(\theta - \alpha)} \quad (7)$$

式中 r 由小变大(从 0 到排种盘半径 R_2), α 由大变小(从 α_{\max} 到 α_{\min}),均与排种盘的形状及结构参数相关,因此种子籽粒能否顺利从 A 点运移至 B 点并从排种口排出的最低转速主要取决于排种盘的半径 R_2 、型面半径 R_1 及圆心 O 的位置。考虑到无人机安装位置及载重等因素,排种器应尽可能设计得小巧,取其直径 $2R_2=100$ mm,高度 $H=35$ mm,排种盘型面半径 $R_1=75$ mm, $\alpha_{\max}=60.99^\circ$, $\alpha_{\min}=8.99^\circ$,排种盘型面与外壳内表面间间隙 5 mm。由(7)式计算出种子籽粒处在最低点 B 时能够被排出所需的最低转速为 18.79 r/min(试验测得华油杂 9 号油菜种子籽粒与排种盘 3D 打印树脂材料的摩擦角 $\theta=10.12^\circ$)。

2.1.2 排种口设计

排种口结构如图 5 所示,呈三通形式,有气压平衡口、型孔和排种出口 3 个出入口,通过螺栓固定连接至排种器外壳,作业时油菜种子籽粒在种群作用力和离心力的作用下,获得较大的初始速度,被型孔囊入后顺着弯管进入竖直管后,在重力作用下流向排种出口。根据离心式排种器型孔堵塞试验结果^[22],取型孔直径 $D=3.8$ mm。为保证型孔囊种后排种顺畅,型孔后通道各处坡度均大于油菜种子籽粒滑动摩擦角^[23],且通道及排种口直径 D_1 均大于型孔直径,实际取 $D_1=6$ mm。



1.气压平衡口 2.型孔 3.排种出口

1. Air pressure balance port 2. Metering hole 3. Metering outlet

注: D 为型孔直径, mm; D_1 为型孔后通道直径, mm。

Note: D is the diameter of metering hole, mm; D_1 is the diameter of channel behind metering hole, mm.

图 5 排种口结构简图

Fig.5 Structural diagram of seed metering port

2.2 导种装置设计

2.2.1 导种装置整体结构和工作原理

无人机下方是个复杂多变的气流场^[24-25]，以下洗气流为主，同时又存在水平面内横向和纵向（相对于机器前进方向）的流动和因机器前进（会有一定前倾）导致的前方来流（向下、向后）。种子籽粒在气流裹挟下大体上相对于地面向下向后运动，受到重力、空气阻力、下洗气流作用力、纵向气流作用力和横向气流作用力等多个力的作用。作用力的大小和方向可能随时间变化，很难给出定量的理论分析和计算。各种气流交织在一起，即使在无自然风的条件下，也会使得排种后种子籽粒无法继续有序定向移动。

为抑制无人机旋翼气流对种子籽粒运移轨迹的扰动、降低种子籽粒投种高度，以保证种子籽粒落地成条的效果，设计一种如图 6 所示的专用导种装置，主要由机载部分和手持部分组成。其中机载部分由罩壳支撑杆、罩壳安装支架、轻质横杆、罩壳、舵机和舵机安装架等组成，舵机转动臂带动横杆做一定角度的转动，舵机及罩壳分别通过舵机安装架及罩壳安装支架固定在无人机脚架上，罩壳上方 6 个通道分别通过橡胶软管连接至排种器排种出口；手持部分由梯形接头和导种管及变向接头、投种管和硅胶尾管等组成。

在作业前的准备阶段，导种装置两部分通过人工抬举方式进行衔接。如表 2 所示，先将无人机悬停在空中

适当高度，通过遥控器遥控操作 4 个舵机同时带动横杆向外张开，然后人工抬举导种装置的手持部分，将梯形接头推入罩壳正下方，当梯形接头上表面及侧壁与罩壳内壁贴合时，再次按下遥控器相应按键，使舵机带动横杆向中间合拢，舵机转动臂旋转到竖直方向时锁止，两根横杆与梯形接头下表面渐进接触，从而实现梯形接头与罩壳紧密贴合，完成种子籽粒通道的有效衔接。作业完成后，采用相反的动作人工取下梯形接头。

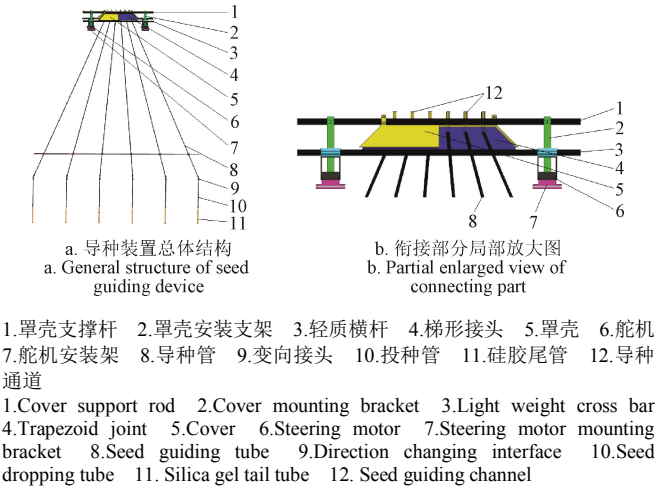


图 6 导种装置结构示意图
Fig.6 Structural diagram of seed guiding device

表 2 导种装置衔接过程
Table 2 Connection process of seed guiding device

项目 Item	准备 Preparing	正在衔接 Connecting	完成 Connected
示意图 Diagram			
实际过程 Actual process			

注：1 为罩壳，2 为舵机，3 为梯形接头。
Note: 1 is the cover, 2 is the steering motor and 3 is the trapezoid joint.

2.2.2 导种装置参数设计

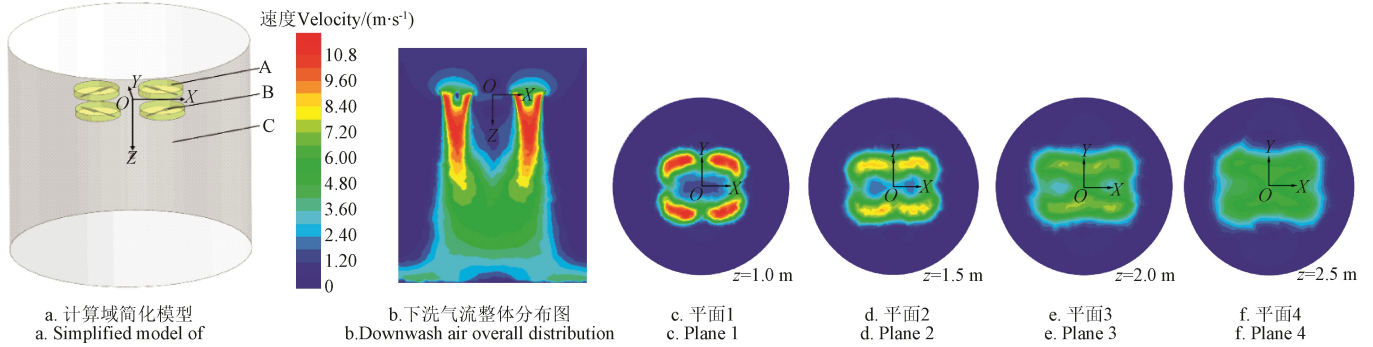
首先，为确保导种装置顺利的衔接、分离和操作人员的安全，对罩壳和梯形接头的机构及参数的设计要综合考虑极飞 P20 下方空间大小以及操作过程中的便捷性和可靠性。其次，导种管的作用是使得从排种器出口出来的种子籽粒流尽可能少地受到旋翼气流的干扰，从而能够继续定向有序分配到地表厢面上。其高度方向的尺寸决定了对气流的抑制效果。

采用 ANSYS 有限元模拟仿真手段获得极飞 P20 型四旋翼无人机产生的下洗气流场。如图 7a 所示，总计算区域划分为 4 个动域和 1 个静域：每个动域为单个无人机

桨片带动空气旋转的圆柱型区域，半径为 0.45 m（略大于无人机桨片的半径），高度为 0.04 m（略大于无人机桨片的空间高度），转速设置为 2 500 r/min；静域为圆柱型外部流场区域，半径为 2 m，高度为 5 m。采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型，压力与速度耦合采用 SIMPLE 解法，控制方程中的对流相和扩散相均设置为二阶迎风格式。仿真结果如图 7b~7f 所示，沿竖直（Z 轴）、横向（X 轴）和纵向（Y 轴，即作业方向）考察气流速度分矢量可知，不同方向的气流对种子籽粒落地成条效果的影响是不同的，其中影响最大的是水平面的横向流动，因其大小变化及与其他方向流动交互作用，会极大改变种子籽粒的

横向位置分布, 因此抑制或削弱其影响是导种装置的首要任务。从图 7b~7f 可以看出, 每个旋翼正下方均存在急速变化的气流扰动区, 旋翼平面下方 0~1.5 m 的范围内, 下洗气流速度较大, 各旋翼下洗气流交叉较少, 但之后逐渐汇聚成一体, 且水平面内存在分速度。气流作用区域内的各方向分速度随离旋翼平面的距离增大而逐

渐减小。为保证获得较好的种子籽粒落地成条效果, 导种管的设置十分有必要。其长度要兼顾考虑气流扰动抑制、人员风险操作和作业飞行安全等多个因素。在播种行距(即末端投种管间距) 0.3 m 前提下, 取硅胶尾管末端离地高度(即投种高度)为 0.2 m, 并准备导种装置高度为 1.5、2.0 和 2.5 m 对应的导种管, 用于试验优选评估。



注: A 为动域, B 为无人机桨片, C 为静域; z 为距离旋翼平面的垂直高度, m。

Note: A is the dynamic domain, B is the UAV blade, C is the static domain; z is the vertical height from the rotor plane, m.

图 7 无人机下洗气流场仿真

Fig.7 Simulation of air flow field of UAV

2.3 控制系统设计

控制系统包括机载排种控制系统和手持遥控器两部分, 二者通过 E32-TTL-100 型无线通信模块进行通信。如图 8 所示, 根据作业飞行速度匹配的排量要求, 设定对应排种转速后, 通过手持遥控器上传至机载排种控制系统, 后者实测 P20 无人机离心喷头的工作状态并自动实时启停排种器, 而导种装置舵机动作在作业准备阶段和终了阶段由人工通过遥控器控制。

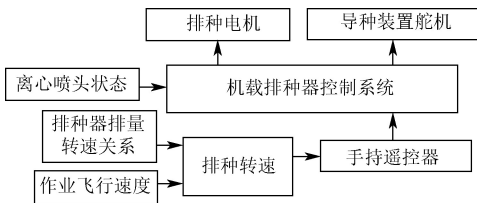


图 8 无人机飞播装置控制逻辑

Fig.8 Control logic of UAV aerial seeding device

3 排种性能台架试验

进行台架试验, 以验证排种系统的各项排种性能指标能否满足油菜播种农艺要求以及单位时间总排量能否满足最大作业速度 5 m/s 所需的排量要求。

3.1 试验指标

参考《GB/T 9478-2005 谷物条播机试验方法》规定的试验方法和指标^[26], 选取各行排量一致性变异系数 CVR、总排量稳定性变异系数 CVT 和种子籽粒破损率 k 为试验指标, 进行排种性能试验。试验指标的计算公式如下:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^a x_i}{j} \quad (8)$$

$$CVR = \frac{\sqrt{\frac{1}{i-1} \sum (x_i - x)^2}}{x} \times 100\% \quad (9)$$

$$y = \frac{\sum_{j=1}^b y_j}{i} \quad (10)$$

$$CVT = \frac{\sqrt{\frac{1}{j-1} \sum (y_j - y)^2}}{y} \times 100\% \quad (11)$$

$$k = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (12)$$

式中 x 为平均行排量, g/min; x_i 为第 i 行排量均值, g/min; j 为试验次数, y 为单位时间总排量均值, g/min; y_j 为第 j 次的单位时间总排量, g/min; m_1 为试验中破损种子籽粒的质量, g; m 为试验中排出的所有种子籽粒的质量, g。

3.2 试验条件及方法

将机器固定在室内台架装置上, 如图 9 所示。



1. 种箱 2. 排种器 3. 无人机 4. 试验台架 5. 导种管 6. 种子籽粒收集袋
1. Seed box 2. Seed metering device 3. UAV 4. Test bench 5. Seed guiding tube 6. Seed collection bag

图 9 排种性能台架试验

Fig.9 Bench test of seed metering performance

以商品化的华油杂 9 号油菜种子籽粒(千粒质量为

4.24 g、含水率为 8.9%) 为试验对象, 排种转速设定 7 个水平 (40、70、100、130、160、190、220 r/min), 每个水平下重复 3 次, 每次测定时间为 1 min, 收集各行排出的种子

籽粒, 分别称质量, 再汇总后人工筛选出破碎损伤的种子籽粒并称质量。记录并根据相关公式计算得到表 3 所示试验数据。

表 3 排种转速对排种性能的影响
Table3 Effect of rotation speed on seed metering performance

排种转速 Seeding rotation speed/ (r·min ⁻¹)	各行排种量 Row seed metering/g						单位时间 总排量 Total seeding quantity per unit time/(g·min ⁻¹)	各行排量一致 性变异系数 CVR/%	总排量稳定性 变异系数 CVT/%	破损种子 籽粒质量 Damaged seed quantity/g	种子籽粒破损率 Seed breakage rate/%
	第 1 行 1st row	第 2 行 2nd row	第 3 行 3rd row	第 4 行 4th row	第 5 行 5th row	第 6 行 6th row					
40	11.225	8.136	9.372	7.213	10.065	12.012	58.023	12.6	6.2	0.690	0.184
	11.903	9.589	11.452	9.350	10.395	11.569	64.258				
	12.978	9.958	11.786	9.244	10.480	10.694	65.140				
70	17.777	13.901	16.423	13.219	14.661	16.394	92.375	10.8	1.4	1.533	0.276
	17.631	14.157	15.888	13.731	14.835	17.694	93.936				
	17.350	13.472	16.203	13.562	14.597	16.257	91.441				
100	20.936	17.257	21.279	18.079	18.927	22.369	118.847	10.3	1.1	2.860	0.4
	22.376	17.485	21.151	16.894	20.621	22.140	120.667				
	21.663	17.489	21.951	17.004	19.741	20.173	118.021				
130	24.445	22.353	22.553	23.273	24.010	24.369	141.003	6.2	0.7	5.084	0.6
	24.299	21.523	24.747	20.573	22.669	26.609	140.420				
	25.314	21.654	24.313	22.145	23.168	25.640	142.234				
160	26.377	23.761	28.663	25.463	26.081	27.012	157.357	4.5	1.3	10.476	1.1
	28.204	26.049	29.130	25.757	27.041	24.938	161.119				
	27.315	24.941	27.110	26.396	26.317	25.637	157.716				
190	30.727	26.351	33.146	27.151	28.881	32.162	178.418	8	1.1	16.035	1.49
	32.123	27.210	32.508	27.077	31.046	31.658	181.622				
	31.558	26.344	31.254	27.336	30.994	34.748	178.034				
220	31.567	26.284	32.384	26.743	31.154	32.172	180.304	8.5	2.2	17.666	1.673
	29.316	27.641	31.268	26.349	30.296	30.194	175.064				
	29.103	26.443	30.812	27.006	30.115	29.114	172.593				

注: CVR 为各行排量一致性变异系数、CVT 为总排量稳定性变异系数。
Note: CVR is variability coefficient of the apiece row seeding quantity consistency, CVT is variability coefficient of the total seeding quantity stability.

3.3 试验结果分析

各项排种性能指标及排量随排种转速变化曲线如图 10 所示。分析可以看出, 排种器单位时间总排量随着排种转速增加呈现先持续增加后趋于稳定。当排种转速为 40~190 r/min 时, 单位时间总排量 y 与排种转速 x 的拟合关系式为

$$y=5.564\ 86x^{0.662\ 17}\ (R^2=0.999)\quad (13)$$

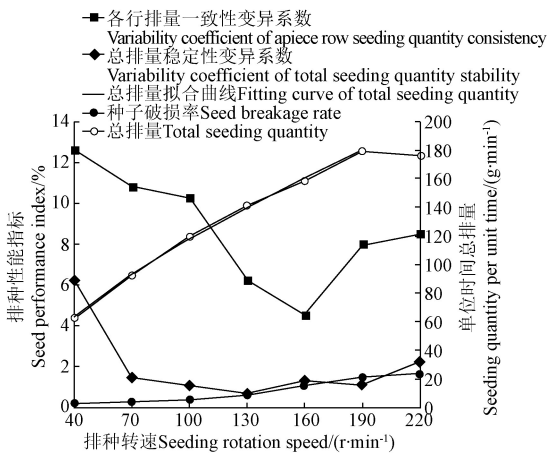


图 10 排种性能随排种转速的变化曲线

Fig.10 Variation of seed metering performance with rotation speed

各行排量一致性变异系数在排种转速较低时值较大, 达到 12.6%, 在排种转速为 40~160 r/min 时随排种转速逐渐减小, 之后随着排种转速增加稍有增加。说明排种盘低速转动时各行排量不稳定, 但总体上维持在 4.5%~12.6% 范围内。该系数反映各行排种通道的差异性, 取值越大说明差异越大。试验中排种器排种口、梯形接头等部分零件采用 3D 打印制作而成, 若采用机加工或注塑方式制作, 有望进一步减小该指标取值。

总排量稳定性变异系数随着排种转速的增加, 先急剧下降后缓慢变化, 当排种转速较大时, 有所增加, 但增幅不大。总体上维持在 0.7%~6.2% 范围内。种子籽粒破损率随排种转速增加而缓慢增加, 最大值为 1.673%, 小于 2%。综上, 排种器性能各系数指标基本满足油菜条播农艺技术要求^[27]。

3.4 单位时间总排量匹配性分析

按照油菜条播农艺技术要求^[27], 无人机作业过程中单位时间内用种量为

$$M = \frac{60Bve}{1\ 000ab}\quad (14)$$

式中 M 为单位时间内的用种量, g/min; B 为作业幅宽, m; v 为飞行作业速度, m/s; a 为株距, m; b 为行距, m; e 为油菜种子籽粒千粒质量, g。

所设计的飞播装置搭载 6 行离心式油菜排种器, 作

业幅宽为 1.8 m,最大作业飞行速度为 5 m/s,株距 0.05 m,行距 0.3 m,华油杂 9 号油菜种子籽粒千粒质量 4.24 g。经计算,作业过程中所需最大用种量为 152.64 g/min。排种性能试验中,一分钟最大平均排量为 179.65 g,说明所设计的排种系统能够满足最大设定飞播作业速度条件下的播量要求。

进一步,在实际作业过程中可根据设定的飞行作业速度取值,先利用式(14)计算出单位时间理论用种量,再根据式(13)反算推出得到对应的排种转速 n 计算式(15),并综合土壤墒情考虑发芽率后适当增大取值。

$$n=\left(\frac{6Bve}{556.486ab}\right)^{1.510}\tag{15}$$

4 样机场地测试试验

飞播种子籽粒落地成条效果受排种系统固有分散度(静止台架试验效果)、飞行器飞行过程中的横向振幅、自然风和旋翼气流等多个因素影响,很难准确量化计算。为验证所设计飞播装置的作业效果,并得到合适的导种装置高度参数,于 2019 年 9 月 24—30 日在华中农业大学拖拉机驾驶场进行样机场地测试试验。

4.1 试验条件

选用华油杂 9 号油菜种子籽粒,设定排种转速 60 r/min,无人机选择自主飞行作业模式,作业速度为 2 m/s,作业飞行高度根据导种装置高度进行设定,保证末端离地高度 0.2 m 左右,自然风风速<2 级。试验场地长度约为 40 m,两头设置加减速缓冲区各 15 m,选取中间 10 m 的匀速飞行区域为采样区,如图 11 所示。因油菜种子籽粒细小且具有较好弹性,在采样区连续设置若

干泥盒以承接下落种子籽粒,以达到固定并显示种子籽粒的目的。任意选取中间泥盒的某处测量点测量每一行导种管对应的种子籽粒成条宽度,取平均值。导种装置竖直方向高度分别为 1.5、2.0 和 2.5 m,每一导种装置高度值的试验重复 3 次。



图 11 数据采集区示意图
Fig.11 Diagram of data acquisition area

4.2 评价指标

目前尚无油菜飞播作业效果评价的国家或行业标准,为此本文提出成条指数的概念。无人机按照拟定飞行速度和作业高度直线飞行作业 40 m,考察稳定作业航线段内地面上种子籽粒的分布成条规律,若呈带状分布且种子带的最大宽度为 w ,定义该宽度与播种设定行距 W 的比值为条播成条指数 T ,即 $T=w/W$ 。该指数反映种子籽粒的分布集中度,取值越小,种子籽粒分散度越小、集中度越好。

4.3 试验结果

根据前述试验方法,得到表 4 所示试验结果。可以看出,3 种高度导种装置条件下的成条指数均较小,成条宽度(落地后种子籽粒分布状况典型结果如图 12 所示)不到设定行距的 1/4,且在 1.5~2.5 m 范围内的导种装置高度与成条指数没有显著相关性($P=0.076\ 9$)。

表 4 导种装置高度与成条指数的关系
Table 4 Relationship between height of seed guiding device and strip index

导种装置竖直方向高度 Height of seed guiding device/m	各行成条宽度 Strip width in each row/mm						平均成条宽度 Average strip width/mm	成条指数 Strip index/%	平均成条指数 Average strip index/%
	第 1 行 1st row	第 2 行 2nd row	第 3 行 3rd row	第 4 行 4th row	第 5 行 5th row	第 6 行 6th row			
1.5	81	53	61	46	76	73	65.0	21.7	21.4
	64	62	54	47	89	69	64.1	21.4	
	76	69	53	44	57	81	63.3	21.1	
2.0	81	53	61	46	76	73	68.3	22.8	22.1
	64	62	54	47	89	69	66.7	22.2	
	76	69	53	44	57	81	64.2	21.4	
2.5	71	53	60	57	62	67	61.7	20.6	21.6
	71	47	65	91	61	65	66.7	22.2	
	67	56	65	64	62	81	65.8	21.9	



图 12 泥盒中油菜种子籽粒典型分布状况(导种装置高度 2 m)
Fig.12 Typical distribution of rapeseeds in the mud box (height of seed guiding device is 2 m)

分析原因可能为:一方面,种子籽粒从排种器出口出来后,在导种管内不受旋翼气流干扰且内腔通过性较高而在自重下加速下落,从尾管出来时已获得较大速度且 3 种高度导种装置的差别不大,而在 0.2 m 投种高度范围内的停留时间非常短;另一方面,旋翼平面下方 1.5 m 之外的气流扰动已开始大大减弱。

5 田间试验

为进一步验证该装置的实际应用效果,于 2019 年 10 月 10 日在湖北省咸宁市马桥镇油菜花海基地开展了田间

播种试验，如图 13a 所示。选取长为 50 m、宽为 20 m 的试验田块，前茬作物为水稻，试验前使用旋耕机进行浅旋并开沟。选取华油杂 9 号油菜种子籽粒，设定无人机自主飞行作业，作业速度为 2 m/s，根据公式（15）推算后并适当放大得到排种转速为 60 r/min，选用 2 m 的导种装置，试验时天气晴好，自然风风速<2 级。

图 13b 为播种 30 d 后的油菜出苗效果。在田间随机选取 18 段，以 1 m 为测算单位，测得成条宽度和出苗数如表 5 所示，进一步分析得到该飞播装置作业时成条指数为 35.0%，播种均匀性变异系数为 19.26%，满足油菜

条播农艺技术要求^[27]。

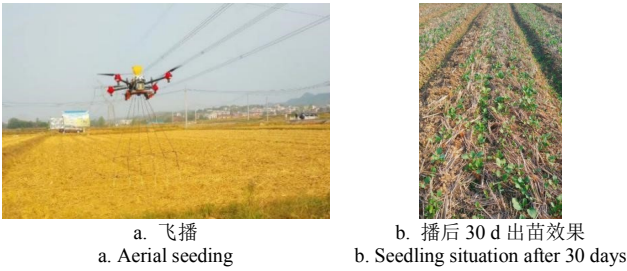


图 13 田间试验
Fig.13 Field experiment

表 5 田间苗情调查结果
Table 5 Field seedling investigation results

项目 Item	田间试验实测数据 Measured data of field experiment																		均值 Mean value	成条 指数 Strip index/%	播种均匀性 变异系数 Variation coefficient of sowing uniformity/%
成条宽度 Width of strips/mm	102	111	123	120	114	143	118	108	137	91	119	82	86	95	113	72	104	75	105.1	30.5	/
出苗数 Seedling emergence	25	18	23	24	27	28	20	24	24	21	26	19	20	16	27	14	17	18	21.7	/	19.26

在进行样机场地测试试验时，采用泥盒承接落下的油菜种子籽粒，能够很好地固定油菜种子籽粒，方便数据测量。而实际田间试验过程中，播种效果受整地质量和无人机地表卷扬气流影响，排出的油菜种子籽粒一部分落入土壤间隙中，另一部分落入土壤表面，反弹或受到卷扬气流作用离散开，而增加了成条宽度。此外，相对于种子籽粒，油菜苗的实际大小也会增大测量误差。因此田间试验出苗成条指数略大于场地测试试验数据。

6 结 论

基于商用植保无人机平台（极飞 P20）开发了一种可近似实现条播效果的油菜飞播装置，采用电驱集排离心式排种器排种，配合专用导种装置导种，有效抑制无人机旋翼气流对下落种子籽粒的扰动作用，实现高速、精量条播（而非“漫”撒播）的播种效果。

1）开展排种性能试验，得出了排种转速对各行排量一致性变异系数、总排量稳定性变异系数和种子籽粒破损率的影响规律。当排种转速在 40~220 r/min 范围逐渐增加时，单位时间总排量呈现先持续增加后趋于稳定；各行排量一致性变异系数和总排量稳定性变异系数先减小后增大；种子籽粒破损率逐渐增大，但均在 2% 以内。

2）样机场地测试试验表明，导种装置高度在 1.5~2.5 m 范围内时，成条指数与其没有显著相关性，但综合考虑在实际作业过程中人员操作风险及便利性等因素，建议选用 2 m 作为该导种装置的适宜高度。在该条件下开展的田间试验表明，所设计的油菜飞播装置满足油菜条播农艺技术要求。

【参 考 文 献】

[1] 李兆东, 雷小龙, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 9—17.

Li Zhaodong, Lei Xiaolong, Cao Xiuying, et al. Design and experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2015, 31(7): 9—17. (in Chinese with English abstract)

[2] 黄海东, 舒彩霞, 段宏兵, 等. 我国油菜机械化播种技术研究现状与发展趋势[C]//纪念中国农业工程学会成立 30 周年暨中国农业工程学会 2009 年学术年会 (CSAE 2009) 论文集, 2009: 411—414.

[3] 傅廷栋. 油菜遗传改良与机械化[J]. 农业技术与装备, 2008(5): 10—11.

Fu Tingdong. Genetic improvement and mechanization of rape[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2008(5): 10—11. (in Chinese with English abstract)

[4] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1—16.

Liao Qingxi, Lei Xiaolong, Liao Yitao, et al. Research progress of rape precision seeding technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1—16. (in Chinese with English abstract)

[5] 廖庆喜, 张宁, 张朋玲, 等. 一器多行离心式油菜排种器[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 48—51.

Liao Qingxi, Zhang Ning, Zhang Pengling, et al. A multi row centrifugal seed metering device for rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48—51. (in Chinese with English abstract)

- [6] 袁文胜, 吴崇友, 金诚谦. 异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 72—75.
Yuan Wensheng, Wu Chongyou, Jin Chengqian. Design and test of wheel seed metering device with special hole and socket hole for rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李明, 刘晓辉, 廖宜涛, 等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 68—73.
Li Ming, Liu Xiaohui, Liao Yitao, et al. Pneumatic roller type precision row collector for rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68—73. (in Chinese with English abstract)
- [8] Zhang C, Kovacs J M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(6): 693—712.
- [9] Cai G, Dias J, Seneviratne L. A Survey of small-scale unmanned aerial vehicles: recent advances and future development trends[J]. Unmanned Systems, 2014, 2(2): 175—199.
- [10] Xiao X, Wei X, Liu Y, et al. Aerial seeding: an effective forest restoration method in highly degraded forest landscapes of sub-tropic regions[J]. Forests, 2015, 6(12): 1748—1762.
- [11] Anderson G W, Batini F E. Pasture, sheep and timber production from agro-forestry systems with subterranean clover sown under 15-year-old Pinusradiata by a method simulating aerial seeding[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1983, 23(121): 123—130.
- [12] Li J Y, Lan Y B, Zhou Z Y, et al. Design and test of operation parameters for rice air broadcasting by unmanned aerial vehicle[J]. International Journal Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(5): 24—32.
- [13] 宋灿灿, 周志艳, 姜锐, 等. 气力式无人机水稻撒播装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 80—88.
Song Cancan, Zhou Zhiyan, Jiang Rui, et al. Design and parameter optimization of pneumatic rice sowing device for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2018, 34(6): 80—88. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈雄飞, 周博聪, 刘木华, 等. 一种离心摆管式播种无人机[P]. CN207631497U, 2018-07-20.
- [15] 李遗. 一种超低空遥控飞行播种施肥机: CN205418091U[P]. 2016-08-03.
- [16] 包胜军. 一种播撒装置及飞行播撒装置: CN106612829A[P]. 2017-05-10.
- [17] Erico P F. Seed plant drone for reforestation[J]. The Graduate Review, 2017, 2: 13—26.
- [18] 敖礼林. 油菜直播丰产增效栽培技术[J]. 农村百事通, 2018(19): 29—31.
- [19] 刘震林. 油菜籽机械化条播技术[J]. 江苏农机化, 2002(2): 11—12.
- [20] 黄丽霞. 油菜直播技术[J]. 湖南农业, 2018(9): 16.
- [21] 翁卫国, 李建庄. 离心排种器试验研究[J]. 农业机械学报, 1991, 22(2): 28—34.
Weng Weiguo, Li Jianzhuang. Experimental study on centrifugal seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(2): 28—34. (in Chinese with English abstract)
- [22] 曹秀英, 廖庆喜, 丛锦玲, 等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计及试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 40—46.
Cao Xiuying, Liao Qingxi, Cong Jinling, et al. Holestructure design and test of centrifugal precision metering device for rape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 40—46. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵进辉, 吴明亮, 汤楚宙, 等. 油菜籽粒物理特性对排种器性能影响的试验研究[J]. 湖南农机, 2004(1): 18—19.
Zhao Jinhui, Wu Mingliang, Tang Chuzhou, et al. Experimental study on the effect of physical characteristics of rape seed on the performance of seed metering device[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2004(1): 18—19. (in Chinese with English abstract)
- [24] Yang Fengbo, Xue Xinyu, Zhang Ling, 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.
- [25] 沈奥, 周树道, 王敏, 等. 多旋翼无人机流场仿真分析[J]. 飞行力学, 2018, 36(4): 29—33.
Shen Ao, Zhou Shudao, Wang Min, et al. Simulation and analysis of multi-rotor UAV flow field[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(4): 29—33. (in Chinese with English abstract)
- [26] GB/T 9478-2005: 谷物条播机试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [27] NY/T 2709—2015: 油菜播种机作业质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

Design and experiment of a device for rapeseed strip aerial seeding

Huang Xiaomao^{1,2}, Xu Huwei¹, Zhang Shun¹, Li Wencheng^{1,2}, Luo Chengming^{1,2}, Deng Yufei¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: UAV can realize track planning and automatic navigation flight due to its small size and flexible operation performance. It has been widely used in the agricultural field for its advantages of high obstacle crossing performance, stability and operation efficiency comparing to ground machines. At present, most UAV based aerial seeding devices use core parts like horizontal centrifugal disc or outer groove wheel to scatter seeds, fertilizers and other materials in the air. Due to the high seeding height and the disturbance of UAV rotor air flow, the randomness of material particles after landing is very large, and they are generally scattered on the whole plane. Although it has high seeding efficiency, it belongs to a relatively extensive seeding mode for that it is not easy to control the seed uniformity affected by many factors. In view of the above problems, a kind of rapeseed aerial seeding device based on an electrically driven centrifugal seeding meter was designed and tested for XAG P20 which is a commercial crop protection UAV. The aerial seeding device can seed in lines instead of wide area, and is more conducive to improve the uniformity of seedlings and the convenience of field management during crop growth. In this study, we first improved the design of the concave cone centrifugal seed metering device and determined the structural parameters of the key components such as seed metering tray and seed metering port. Then, based on ANSYS Fluent simulation software, the distribution of downwash air flow field of the XAG P20 drone was analyzed. An auxiliary seed guiding device used in combination with the centrifugal seed metering device was proposed and built. Three experiments including the seed metering performance test, the prototype test and the field test were carried out to analyze and study the functions of the aerial seeding device. The results showed that the total seeding quantity per unit time increased when the seeding rotation speed increased from 40 to 190 r/min, and the maximum total seeding quantity reached 179.65 g/min at 190 r/min, which can meet the requirements of 0-5m/s operation speed of the drone; the variation coefficient of consistency and stability of apiece row seeding quantity decreased first and then increased, which were distributed in the range of 4.5%-12.6% and 0.7%-6.2% respectively. The damage rate of seeds increased gradually, but all of which were within 2%. The prototype test showed that when the height of the seed guiding device was in the range from 1.5 to 2.5 m, the width of the seed strips was less than 1/4 of the row spacing, and the striping index of the seed had no significant correlation with it. However, considering the operational risk and convenience of the personnel in the actual operation process, the height of 2m was selected as the appropriate height of the seed guiding device. Under that condition, the field experiment results showed that the strip index was 35.0%, the variation coefficient of sowing uniformity was 19.26%. The device designed in this study can meet the technical requirements of rape drilling.

Keywords: UAV; design; rape aerial seeding; centrifugal seeding meter; anti-disturbing technology of rotor air flow