

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.11.008

# 基于无人机平台的绿肥种子撒播装置设计与试验

高学梅 游兆延 吴惠昌 彭宝良 王申莹 曹明珠

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘要:** 针对水稻收获前稻田以及丘陵山区播种绿肥, 存在机具无法下田作业、人工撒播劳动强度大的问题, 基于农用多旋翼无人机平台, 设计离心甩盘式绿肥种子撒播装置。该装置可与多品牌无人机方便、快速组配挂接, 主要由挂接机构、种箱、排种机构、撒种机构及自动控制系统构成, 设计螺旋输送式排种机构可实现连续稳定定量排种, 优化撒种机构使得撒播更加均匀顺畅, 控制系统可跟随无人机飞行速度控制排种机构排种量, 并根据不同品种绿肥种子设定撒种机构甩种盘转速, 从而实现多品种绿肥种子定量排种、均匀撒播。选取典型绿肥品种紫云英种子为试验物料, 以撒播均匀性变异系数  $Y_1$  和单位面积撒种量误差  $Y_2$  为评价指标, 螺旋输送机转速  $A$ 、甩种盘转速  $B$ 、飞行速度  $C$  为试验因素, 开展三因素三水平正交试验。结果表明: 螺旋输送机转速  $A$  和甩种盘转速  $B$  对两评价指标影响极显著, 飞行速度  $C$  对两评价指标影响显著, 影响撒播均匀性变异系数  $Y_1$  的次要因素为  $B$ 、 $A$ 、 $C$ , 影响单位面积撒种量误差  $Y_2$  的次要因素为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ , 最佳因素水平组合  $A_2B_2C_2$ , 即  $A$  为 190 r/min、 $B$  为 1700 r/min、 $C$  为 5 m/s 时,  $Y_1$  为 28.47%,  $Y_2$  为 11.81%。田间试验表明, 在最佳参数组合下, 整体出苗良好。该研究为改进完善无人机离心甩盘式绿肥撒播装置, 以及大面积推广绿肥种植提供了理论依据和装备支撑。

**关键词:** 撒播装置; 绿肥种子; 无人机

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)11-0076-10

OSID:



## Design and Experiment of Green Manure Seed Broadcast Sowing Device Based on Unmanned Aerial Vehicle Platform

GAO Xuemei YOU Zhaoyan WU Huichang PENG Baoliang WANG Shenying CAO Mingzhu  
(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** There are great difficulties in sowing green manure in paddy fields before rice harvest and in hilly and mountainous areas. These problems mainly include sowing equipment cannot work in the field and the labor intensity of manual sowing is high. Based on the agricultural multi rotor unmanned aerial vehicle platform, a centrifugal disc type green manure seed broadcast sowing device was developed, which can be used to sow seeds such as Chinese milk vetch and *Orychophragmus violaceus*. The device can be easily and quickly assembled and connected with unmanned aerial vehicle platform. It was mainly composed of hitch mechanism, seed box, seed metering mechanism, broadcast sowing mechanism and sowing automatic control system. The screw conveying seed metering mechanism was used to achieve continuous and stable quantitative seed metering. After the broadcast sowing mechanism was optimized, the seeding was more uniform and smooth. The control system can follow the unmanned aerial vehicle flight speed to control the seed amount of the seed metering mechanism, and set the rotation speed of the seed-rotating disc for broadcast sowing mechanism according to different varieties of green manure seeds, so as to complete the quantitative seeding and uniform sowing of different varieties of green manure. The seed of milk vetch, a typical green manure variety, was selected as the test object. Three-factor and three-level orthogonal performance test was carried out with setting variation coefficient of sowing uniformity  $Y_1$  and relative error of sowing rate  $Y_2$  as the evaluation indexes, rotation speed of the auger for seed metering mechanism  $A$ , rotation speed of the seed-rotating disc for broadcast sowing mechanism  $B$

收稿日期: 2022-04-01 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业绿肥产业技术体系项目(CARS-22)和中国农业科学院所级基本科研业务费专项(S202012)

作者简介: 高学梅(1984—), 女, 助理研究员, 主要从事绿肥生产机械装备研究, E-mail: 591882839@qq.com

通信作者: 吴惠昌(1973—), 男, 研究员, 主要从事农业机械化及智能农机装备研究, E-mail: huichangwu@126.com

and flight speed  $C$  as the influence factors. According to the results of orthogonal test, rotation speed of the auger for seed metering mechanism  $A$  and rotation speed of the seed-rotating disc for broadcast sowing mechanism  $B$  had extremely significant influence on the two evaluation indexes, flight speed  $C$  had significant influence on the two evaluation indexes. The importance order of the factors which affected the  $Y_1$  was  $B, A$  and  $C$ , and affected the  $Y_2$  was  $A, B$  and  $C$ , the optimal combination of working parameters was  $A_2B_2C_2$ ,  $A$  was 190 r/min,  $B$  was 1 700 r/min,  $C$  was 5 m/s, and  $Y_1$  was 28.47%,  $Y_2$  was 11.81%. The field experiment under the optimal combination of working parameters showed that the seedling emergence was good. The research result provided a theoretical basis for improving the green manure broadcast sowing device based on unmanned aerial vehicle platform, and provided equipment support for large-scale promotion of green manure planting.

**Key words:** broadcast sowing device; green manure seed; unmanned aerial vehicle

## 0 引言

绿肥能够提升地力、减施化肥、美化农田、提质增效,水田种植绿肥具有改变土壤理化性质、增加土壤有机质、提高作物产量和品质等优点<sup>[1-5]</sup>。但因种植绿肥当季无明显效益,以及受化肥工业的迅猛发展等多种因素影响,20世纪80年代至本世纪初,绿肥产业发展处于萧条期,绿肥生产机械研发也处于停滞阶段,近年来我国在轮作休耕、耕地质量提升、果蔬茶有机肥替代、绿色发展和乡村振兴等国家政策推动以及绿肥相关的国家专项项目支持下,绿肥产业进入了生产回升、科研快速恢复时期<sup>[3]</sup>。但绿肥生产作业机械投入少,仍主要借用其他大田作物生产装备,存在作业适应性差、专用性不强、技术水平偏低等诸多问题,尤其是水稻收获前的稻田以及丘陵山区地带不适于机具下田作业,主要靠人工撒播,耗时费力<sup>[6-8]</sup>,缺乏适合多品种绿肥播种的可靠性设备。

目前农用无人机进入快速发展时期,因其作业效率高、不易受地形限制作业等优势,逐渐得到市场认可,根据典型绿肥品种紫云英种子播种农艺要求,种子可直接撒播于地表,因此无人机飞播模式可完全满足紫云英种子播种要求,但适用于紫云英等绿肥种子的无人机撒播装置未见相关报道。发达国家农业耕作模式以及配套制度相对较为完善,所应用的无人机播种设备价格昂贵,不适合我国国情<sup>[9-14]</sup>。我国在水稻、油菜等农作物无人机播种已有研究,陈博<sup>[15-16]</sup>设计的水稻种肥一体化精量直播无人机,可实现水稻精量条播,同时其模块化设计可快速与无人机撒播装置进行更换,通过闸门式调节机构控制排种机构的排种量。李遗<sup>[17]</sup>设计的超低空遥控播种施肥机,采用圆盘式出料抛撒机构将肥料抛撒出去。彭冬星<sup>[18]</sup>设计的无人机水稻撒播机,采用L形搅拌棒辅助排种,控制系统可调节种箱开口、搅种棒和圆盘转速。宋灿灿等<sup>[19]</sup>设计的气力式

无人机水稻撒播装置,主要通过气流将种子沿不同的方向吹送撒播出去。张青松等<sup>[20]</sup>设计的油菜飞播装置,排种机构为槽轮式,通过槽轮旋转将种子带入导种管,种子由出料口排出。黄小毛等<sup>[21]</sup>设计的油菜成条飞播装置,排种机构采用离心式排种盘,并配有橡胶软管导种机构,最终将油菜成条撒播。罗锡文等<sup>[22]</sup>在无人机撒播机载装置的物料箱内设计涵道风扇式搅拌机构,将物料输送至撒播轮盘上再撒播出去,目前无人机播种装置排种机构多采用槽轮式扇面或杆齿搅拌式,排量主要通过挡板或闸门开口调节。

本文基于农用多旋翼无人机平台,优化设计排种机构、撒种机构等关键部件,设计可方便快速与不同品牌无人机组配挂接,且适合紫云英等多品种绿肥种子播种的撒播装置。

## 1 整机结构及工作原理

基于无人机平台的绿肥种子撒播装置结构如图1所示,主要由挂接机构、种箱、排种机构、撒种机构及撒播自动控制模块组成。种箱由挂接机构固定于无人机机体正下方,其出料口与排种机构进料口配合连接,排种机构出料口通过支撑横梁与撒种机构进料口连接。整机技术参数如表1所示。

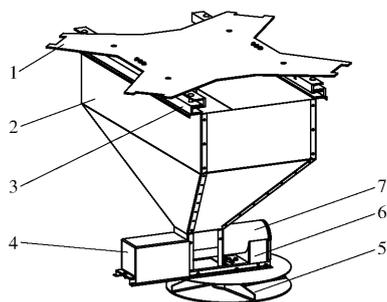


图1 绿肥种子撒播装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of green manure seed broadcast sowing device

1. 无人机底板
2. 种箱
3. 挂接机构
4. 排种电机罩
5. 撒种机构
6. 导料口
7. 排种机构

表1 主要技术参数

Tab. 1 Technical parameters of broadcast sowing device

参数	数值/类型
无人机平台	山东风云、拓攻机器人等多平台
外形尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	2 000×2 000×520(机翼展开) 1 410×1 410×520(机翼折叠)
飞行速度/(m·s <sup>-1</sup> )	4~6
种箱容量/kg	12
撒播幅宽/m	≥5
排种机构螺旋输送机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	160~210
撒种机构甩种盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 400~2 000
撒播效率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	4~6
撒播方式	地表撒播
整机质量(不含电池)/kg	13.6

作业时,种子由种箱进入排种机构,由排种机构的螺旋输送机输送至撒种机构的甩种盘,再由甩种盘将种子撒播出去。其中控制系统根据播种作物单位面积用种量要求及无人机飞行速度,控制排种机构电机转速,实现排种机构定量排种;前期已通过试验确定了不同品种绿肥种子所对应的最佳甩种盘转速,通过绿肥品种选择开关实现不同品种绿肥种子对应的甩种盘转速,方便快捷。该装置在各个模块的配合下,可实现不同品种绿肥种子单位面积内均匀、定量撒播<sup>[23]</sup>。

## 2 关键部件及自动控制系统设计

### 2.1 挂接机构

为实现绿肥种子撒播装置与不同品牌无人机的快速组配,以及便于绿肥种子撒播装置与喷药植保装置方便切换,设计抽拉式挂接机构,结构简单。挂接机构的装配示意图如图2所示,主要由上、下两组U形导轨组成,每组导轨各2条,上、下导轨通过固定螺钉分别固定于无人机底板和种箱上。无人机可通过上挂接导轨和下挂接导轨快速组配,再通过限位销轴将上下导轨固定,可防止作业时导轨相互滑动错位。

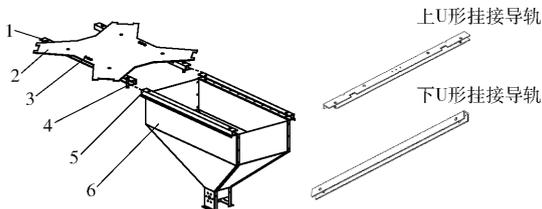


图2 挂接机构

Fig. 2 Hitch mechanism

1. 上U形挂接导轨
2. 无人机底板
3. 固定螺钉
4. 限位销轴
5. 下U形挂接导轨
6. 种箱

### 2.2 种箱

种箱结构及尺寸设计需综合考虑方便与无人机

组配,不影响无人机起飞降落,且还需考虑关键参数载种量,理想状态是加种一次,待种子播种完成时恰好达到无人机电池最大续航能力,减少因加种或电池充电增加的无人机飞行无用功耗。因不同品牌无人机电池续航能力存在差异,且不同品种的绿肥作物播种量不同,为达到以上理想状态,针对紫云英等小粒绿肥种子,种箱最大载种量设计为12 kg,可满足播种量在3~50 kg/hm<sup>2</sup>内的绿肥种子撒播要求。该装置选用铝合金材料,且紫云英种子在其上的静摩擦角小于在塑料材料上的摩擦角,较塑料种箱更有利于种子顺畅下落。

种箱设计成上方下棱锥型(图3),主要由前种箱板、后种箱板和两块侧板组成。

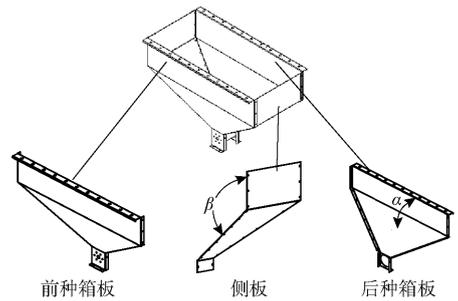


图3 种箱结构简图

Fig. 3 Structure diagram of seed box

种箱开口尺寸设计以图2的挂接导轨为依据,下部棱锥型设计可增加种箱内部排种顺畅性和彻底性,且可解决因种箱内四周种子挂壁、中间下降速度过快,造成排种机构供种不稳的难题。

为使种子在种箱内顺畅快速下落,种箱侧板倾斜角需大于绿肥种子在铝板表面的最大静摩擦角,即种箱板和侧板折弯角 $\alpha$ 和 $\beta$ (图3)应满足种子可在其上顺利下滑,试验测得常见绿肥品种的种子滑动摩擦角如表2所示。其中黑麦草滑动摩擦角最大,为30°,综合考虑种箱结构,该装置 $\alpha$ 和 $\beta$ 分别设计为146.4°和132.6°,可满足主要绿肥品种紫云英种子等在种箱内顺利下落。

表2 主要绿肥品种种子滑动摩擦角

Tab. 2 Sliding friction angle of main green manure varieties (°)

品种	紫云英	毛叶苕子	箭筈豌豆	肥田萝卜	二月兰
滑动摩擦角	27	18	20	25	28
品种	油菜	田菁	光叶苕子	黑麦草	山黧豆
滑动摩擦角	11	24	16	30	24

### 2.3 排种机构

排种机构是整个撒播装置的核心,传统排种机构通过闸门式限料板控制物料出口的开口来调节排种量,无法达到精确持续稳定排种,螺旋输送不仅具

备不易卡料堵料的优点,且通过调整输送机转速来控制排种量,可实现持续、稳定、均匀且定量排种。

排种机构安装在种箱下端(图 1),主要由排种调速电机、螺旋输送机、排种管、安装支架等组成(图 4),种箱内种子由排种管进口口进入排种机构,在排种电机驱动下,螺旋输送机旋转推动种子移向排种装置出料口,经导料口进入撒种机构。

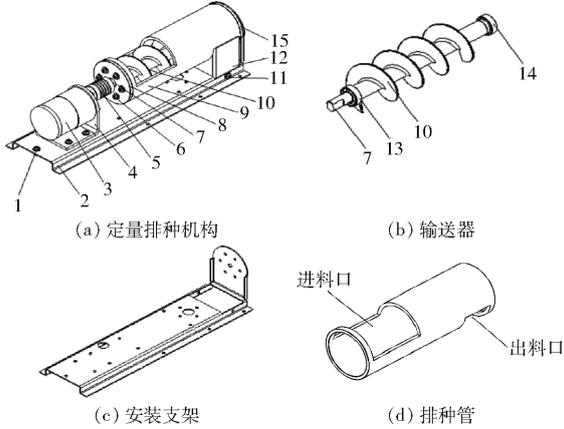


图 4 定量排种机构

Fig. 4 Quantitative seed metering mechanism

1. 排种电机罩固定螺钉 2. 安装支架 3. 排种电机 4. 排种电机支架 5. 联轴器 6. 前种箱板固定螺钉 7. 输送机轴 8、15. 支撑法兰 9. 排种管 10. 输送机 11. 导料口固定螺钉 12. 导料口 13、14. 轴承

排种机构单位时间内所需排种量  $I_m$  为

$$I_m = QvF \quad (1)$$

式中  $Q$ ——单位面积播种量,  $\text{kg}/\text{m}^2$

$v$ ——无人机飞行速度,  $\text{m}/\text{s}$

$F$ ——有效撒播幅宽,  $\text{m}$

根据实践经验与撒播装置设计要求,并结合紫云英、二月兰等小粒种子播量农艺要求,  $Q$  选为  $0.005 \text{ kg}/\text{m}^2$ ,  $v$  为  $5 \text{ m}/\text{s}$ , 有效撒播幅宽  $F$  为  $5 \text{ m}$ , 通过计算可得  $I_m = 450 \text{ kg}/\text{h}$ 。

螺旋输送机螺旋直径  $D$  需满足

$$D > \sqrt[2.5]{\frac{I_m}{47k_s Z \psi \rho J}} \quad (2)$$

式中  $k_s$ ——螺距与螺旋直径比值

$Z$ ——物料综合系数

$\rho$ ——物料容重,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$J$ ——螺旋输送倾角系数

$\psi$ ——填充系数

由式(1)、(2)可得排种量和螺旋直径,进而推导出螺距、螺旋轴直径以及螺旋轴最大转速,并根据螺旋轴最大转速来选取电机型号<sup>[24]</sup>。

通过查阅连续输送机械设计手册可知,  $k_s = 0.8$ ,  $Z = 50$ ,  $\psi = 0.45$ ,  $J = 1$ 。测得主要绿肥品种种子容重  $\rho$  均值约为  $750 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 将  $I_m$  代入式(2), 并

根据排种机构尺寸等实际设计要求及经验,螺旋直径  $D$  设计为  $56 \text{ mm}$ , 螺距  $L$  为  $45 \text{ mm}$ 。螺旋输送机转速计算式为

$$n = \frac{I_m}{47D^2 J L \psi \rho} \quad (3)$$

式中  $n$ ——螺旋输送机转速,  $\text{r}/\text{min}$

相关数据代入式(3)可知  $n = 201 \text{ r}/\text{min}$ 。

最大螺旋轴转速为

$$n_{\max} = \frac{Z}{\sqrt{D}} \quad (4)$$

相关数据代入式(4)可知  $n_{\max} = 211 \text{ r}/\text{min}$ 。  $n < n_{\max}$ , 满足要求。

还需对  $\psi$  值进行验算,将相关数据代入

$$\psi = \frac{I_m}{47D^2 J L \rho n} \quad (5)$$

可得  $\psi = 0.45$ , 满足《连续输送机械设计手册》推荐值范围要求,故以上计算合理<sup>[24]</sup>。

根据螺旋轴允许的最大转速,并结合实际情况,选用 ASLONG JGB37-3540 型直流减速电机,可满足绿肥种子撒播装置排种需求。

总排料量即为排种机构在单位时间内排出的总种子质量或数量,总排料量稳定性变异系数可表征总排料量稳定性,直接关系到后期田间作物的出苗整齐性。根据标准测定总排料量变异系数时<sup>[25]</sup>,需将无人机固定且其控制命令置于某一固定指示值,设定排种螺旋输送机转速为  $200 \text{ r}/\text{min}$ , 甩种盘转速为  $1800 \text{ r}/\text{min}$ , 以紫云英种子为物料,测试工作  $1 \text{ min}$  排出种子质量,重复 5 次,测得总排料量稳定性变异系数为  $1.36\%$ , 优于标准要求。

## 2.4 撒种机构

采用离心甩盘式撒种机构进行种子撒播,该形式撒播机构生产成本低、效率高、转速可适应不同绿肥品种、方便可调。

撒种机构固定安装在排种机构下方,主要由支撑梁、甩种盘、甩种盘盖和撒种电机等组成(图 5)。支撑梁将排种机构和撒种机构固定连接在一起,撒种电机两端分别通过螺栓将支撑梁和甩种盘固连在一起,撒种电机、甩种盘盖和甩种盘同轴配置。甩种盘配有 4 片甩种叶片,叶片夹角  $\theta$  设计如图 5 所示,根据试验设定为  $15^\circ$ ,无刷电机可方便调节甩种盘转速,根据试验及经验,选取 EAGLEPOWER LA3620 KV40 型无刷电机。种子由排种机构排出,通过导料口落入甩种盘,在离心力的作用下,随着甩种盘的高速旋转沿叶片均匀抛撒出去。

撒种电机、甩种盘盖和甩种盘采用同轴配置方式,可使得由排种机构排出的绿肥种子,恰好被中间

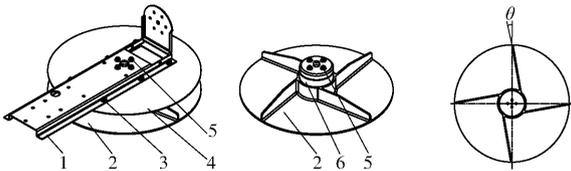


图5 均匀撒种机构

Fig. 5 Uniform broadcast sowing mechanism

1. 支架梁 2. 甩种盘 3. 甩种盘盖固定螺钉 4. 甩种盘盖 5. 电机固定螺钉 6. 撒种电机

轴分散开来,避免堆积中间不能及时撒播出去而造成堵塞,且甩种盘和撒种电机同轴固定连接,甩种盘和甩种盘盖之间无任何横档等阻隔,相比有横档阻隔的甩种盘<sup>[15]</sup>,提高了作业顺畅性、撒播均匀性和可靠性。

因不同品种的绿肥种子自身物料特性不同,且排种机构可实时定量排种,即落入甩种盘的种子量稳定,前期已通过试验确定了不同品种绿肥种子所对应的最佳甩种盘转速。因此根据不同品种绿肥种子调整成相应的甩种盘转速,可实现多品种绿肥种子的均匀撒播。

## 2.5 定量撒播自动控制系统

### (1) 定量排种理论分析

螺旋输送机排种机构时间  $t$  内排种量  $W$  为

$$W = K\rho n t \quad (6)$$

式中  $K$ ——螺旋输送机旋转一圈排出种子的体积,由螺距和物料容重决定,  $\text{m}^3$

排种机构在时间  $t$  内排出的排种量,即为无人机绿肥撒播装置工作时,时间  $t$  内撒播到田间的撒种量  $W_1$  为

$$W_1 = FvtQ \quad (7)$$

其中  $F$  为常数,因无人机具备自动避障功能,实际作业时播种飞行高度固定,在已有试验基础上,针对某一品种绿肥种子,飞行高度固定的条件下,根据试验测得最佳转速,故该转速下有效撒播幅宽固定。

由式(6)、(7)可得

$$Q = \frac{K\rho n}{Fv} \quad (8)$$

由式(8)可知,  $K$ 、 $\rho$ 、 $F$  均为常数,参考农艺要求,为使单位面积撒种量  $Q$  固定,需满足螺旋输送机转速随着无人机飞行速度的变化而变化。

排种机构可通过控制系统实现跟随无人机飞行速度的变化来实时调整螺旋输送机转速,螺旋输送机转速又由压控直流减速电机驱动,即通过电压控制电机转速,可结合不同品种绿肥种子单位面积播种量以及无人机飞行速度由电机转速来实时调整螺旋输送机转速,最终实现定量均匀排种。

选取芜湖青弋江种业有限公司生产的青弋江1号紫云英种子为试验物料,测得排种量随电机电压变化规律如图6所示,由图6可知,紫云英种子排种量随着电机电压变化接近线性,说明螺旋输送机排种机构的排种量随无人机飞行速度可方便调控。

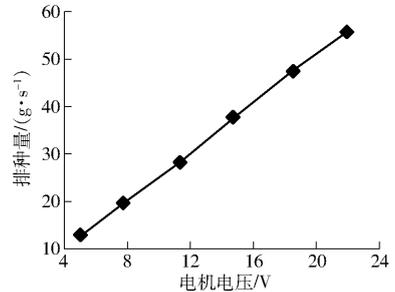


图6 排种量-电机电压变化曲线

Fig. 6 Change curve between seed quantity and motor voltage

### (2) 控制系统构成

定量撒播自动控制系统由硬件和软件构成,主要由排种机构控制模块、撒种机构控制模块等组成,各模块间共同作用,使得该装置可满足不同绿肥品种定量均匀播种,控制原理框图如图7所示,控制系统硬件电路图如图8所示。

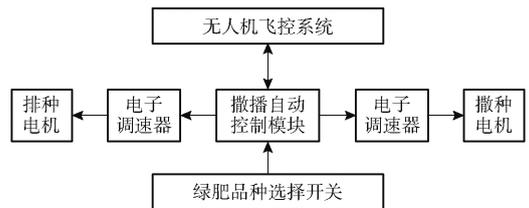


图7 控制系统框图

Fig. 7 Schematic of control system

图8中撒播自动控制模块与无人机飞控系统的通讯硬件接口为有线TTL电平的异步串行UART,通讯协议采用微型无人机飞控系统通用的MAVLink协议,可实现全双工通讯。图8中单片机U1为撒播自动控制模块的核心,主要负责与无人机飞控系统的通讯、电机驱动信号输出、撒播数据的计算和存储等。S1为拨动地址开关,即绿肥品种选择开关,用于设定绿肥品种,根据当前撒播绿肥品种,以便微处理器读取相应品种的撒播参数。U2为EEPROM数据存储器件,可存储不同品种绿肥撒播参数,如不同品种的绿肥种子单位面积用种质量、有效撒播幅宽等,其通过I<sup>2</sup>C接口与微处理器通讯,即SDA和SCL两管脚。TXD和RXD为撒播自动控制模块与飞控系统通讯信号,获取飞控系统飞行速度等信息。OC1和OC2为微处理器AD采样输入口,分别采样排种电机和甩种电机的驱动电流,检测电机工作负载状态。A1+、A1-、B1+、B1-、C1+、

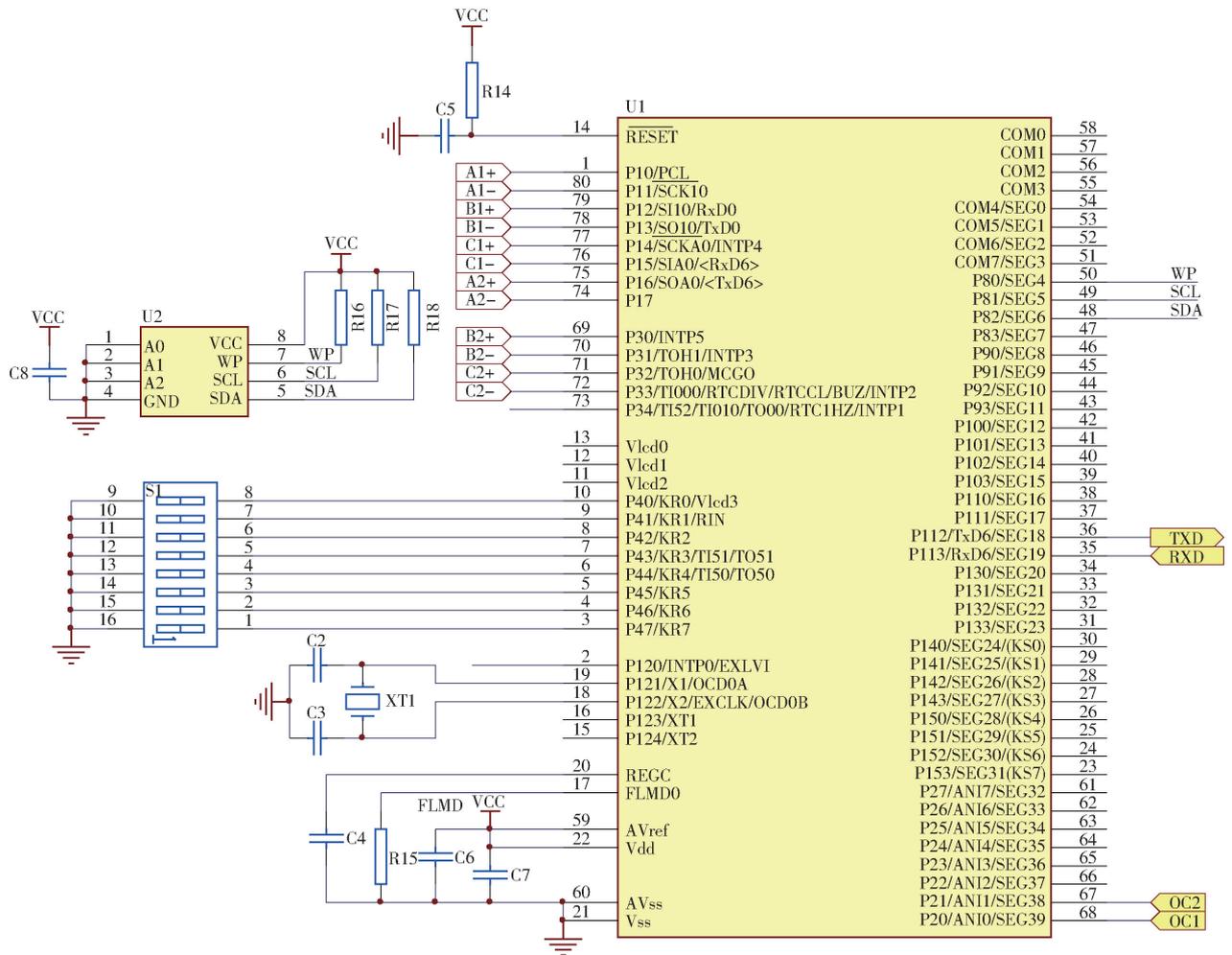


图 8 控制系统硬件电路图

Fig. 8 Hardware diagram of control system

C1 - 为排种电机调速信号输出; A2 +、A2 -、B2 +、B2 -、C2 +、C2 - 为甩种电机调速信号输出。输出转速对应的 PWM 信号给电子调速器, 电子调速器通过内部驱动电路, 实现电机转速的调控。

撒播自动控制系统程序采用 C 语言进行编程, 控制流程图如图 9 所示。撒播作业时, 根据绿肥品种选择开关选择当前撒播的绿肥品种, 确定该品种单位面积播种量等撒播参数, 并实时读取无人机飞控系统飞行速度, 利用电子调速器, 实时调整排种电机和撒种电机转速, 从而控制排种速度以及甩种盘转速, 保证单位面积内播量持续稳定。

### 3 试验与结果分析

为验证离心甩盘式无人机绿肥撒播装置的撒播均匀性以及单位面积播种量的准确性, 对绿肥撒播装置开展性能试验。

#### 3.1 试验条件

在江苏溧水白马农业机械化技术创新试验基地开展试验研究, 天气多云, 东北风 3 ~ 4 级。试验物料为芜湖青弋江种业有限公司生产的紫云英青弋江

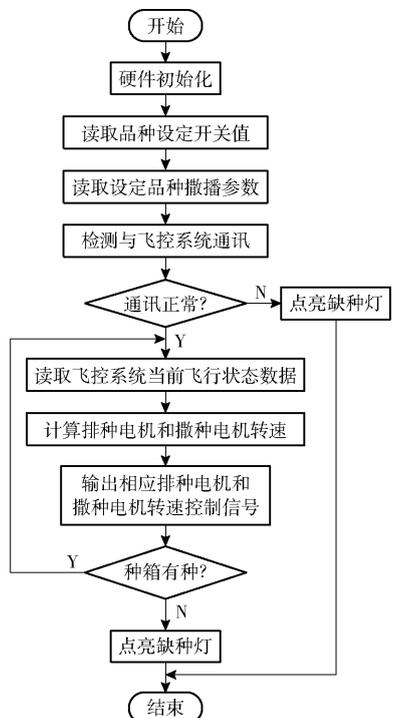


图 9 控制系统流程图

Fig. 9 Flowchart of control system

1号,含水率11.80%,容重 $0.73\text{ g/cm}^3$ 。无人机为山东风云农业科技有限公司生产的四旋翼无人机。

### 3.2 试验方法

结合实际撒播作业情况,试验测试方法及考核指标主要参照文献[25-28]。

先将撒播装置与无人机装配完成后,再添加紫云英种子,开展撒播试验(图10)。参考遥控飞行播种机质量评价技术规范,并考虑到稻田水稻植株高度,同时结合实际作业经验,无人机飞行高度设定为离地面2m,撒播有效幅宽5m,飞行航线根据遥控飞行播种机质量评价技术规范作业方式飞行,根据标准取样盒放置3排即可,为减小试验误差,以保证测试数据的准确性,将尺寸 $240\text{ mm} \times 165\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 取样盒平放在试验区域的中间位置,每个取样盒之间排成行列间距均为1m的 $11 \times 11$ 的矩阵,即共121个取样点,根据遥控飞行播种机质量评价技术规范,只需称量其中3排取样盒内种子质量,为避免在取样过程中取样盒不小心打翻和核实称量的准确性,取样盒数量多于标准要求。



图10 无人机绿肥撒播装置场地试验

Fig. 10 Experiment of green manure broadcast sowing device based on unmanned aerial vehicle platform

撒播均匀性和单位面积播种量准确性是衡量撒播机构播种性能的参数,单位面积播种量是否符合农艺要求最直接的指标,直接关系到后期的出苗整齐率和紫云英产量。其中撒播均匀性可通过撒播均匀性变异系数 $Y_1$ 计算,单位面积播种量准确性可通过单位面积撒种量误差 $Y_2$ 计算。

撒播均匀性变异系数 $Y_1$ 通过称取取样盒内种子质量计算得出,该指标可直接反映后期播种作物出苗均匀性<sup>[29]</sup>。

根据紫云英单位面积播种量农艺要求,为判断无人机撒播装置播种量的准确性,以单位面积撒种量误差 $Y_2$ 为考核指标,计算式为

$$Y_2 = \frac{\left| \frac{M}{S} - Q_z \right|}{Q_z} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $M$ ——取样区内撒播种子总质量,g

$S$ ——取样区面积, $\text{m}^2$

$Q_z$ ——理论目标撒种量,取 $2.25\text{ g/m}^2$

### 3.3 试验结果分析

以撒播均匀性变异系数 $Y_1$ 和单位面积撒种量

误差 $Y_2$ 为评价指标,在前期试验基础上,选取排种机构螺旋输送机转速、甩种盘转速、飞行速度为试验因素,开展三因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交试验<sup>[30]</sup>,试验因素水平如表3所示。每组试验重复测定3次并取平均值为最终测定结果。试验方案与试验结果如表4所示。 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为水平值,试验方差和极差分析结果如表4、5所示<sup>[31-33]</sup>。

表3 正交试验因素水平

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	螺旋输送机转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	甩种盘转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	飞行速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	170	1 400	4
2	190	1 700	5
3	210	2 000	6

表4 试验设计方案与结果

Tab. 4 Results of orthogonal

试验序号	因素			撒播均匀性变异系数 $Y_1/\%$	单位面积撒种量误差 $Y_2/\%$	综合评价
	A	B	C			
1	1	1	1	29.81	13.12	0.22
2	1	2	2	28.04	12.28	0.78
3	1	3	3	27.62	12.93	0.62
4	2	1	2	29.88	12.12	0.56
5	2	2	3	28.79	11.83	0.82
6	2	3	1	28.11	12.55	0.67
7	3	1	3	31.24	12.86	0.09
8	3	2	1	29.86	12.77	0.33
9	3	3	2	28.52	12.76	0.54
$k_1$	28.49	30.31	29.26			
$k_2$	28.93	28.90	28.81			
$Y_1$	$k_3$	29.87	28.08	29.22		
	R	1.38	2.23	0.45		
	$k_1$	12.78	12.70	12.81		
	$k_2$	12.17	12.29	12.39		
$Y_2$	$k_3$	12.80	12.75	12.54		
	R	0.63	0.46	0.42		
	$k_1$	0.54	0.29	0.41		
综合	$k_2$	0.68	0.64	0.62		
评分	$k_3$	0.32	0.61	0.51		
	R	0.36	0.35	0.21		

由表4可知,影响撒播均匀性变异系数 $Y_1$ 主次因素为 $B$ 、 $A$ 、 $C$ ;影响单位面积撒种量误差 $Y_2$ 主次因素为 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 。

由表5可知,3个因素对撒播均匀性变异系数 $Y_1$ 和单位面积撒种量误差 $Y_2$ 都有显著影响,且排种机构螺旋输送机转速和甩种盘转速对两个评价指标影响都极显著。

表 5 试验结果方差分析

Tab. 5 Analysis of variance

评价指标	变异来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方和	F	P
$Y_1$	校正模型	10.982	6	1.830	250.721	
	A	3.000	2	1.500	205.511	0.005 **
	B	7.617	2	3.809	521.717	0.002 **
	C	0.364	2	0.182	24.936	0.039 *
	误差	0.015	2	0.007		
$Y_2$	校正模型	1.423	6	0.237	145.177	
	A	0.769	2	0.385	235.531	0.004 **
	B	0.373	2	0.187	114.204	0.009 **
	C	0.280	2	0.140	85.796	0.012 *
	误差	0.003	2	0.002		

注: \* 表示显著 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著 ( $P < 0.01$ )。

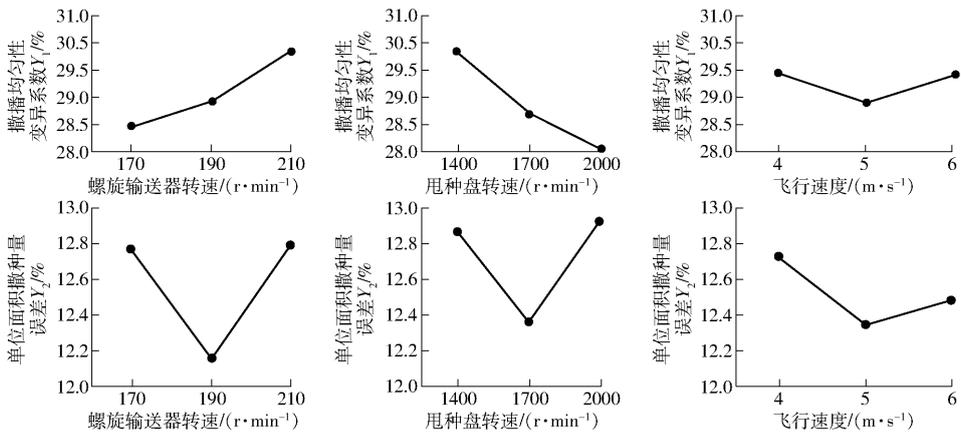


图 11 各因素对指标的影响规律

Fig. 11 Influence of each factor on index

单位面积撒种量误差  $Y_2$  随着 A、B、C 3 因素的增加都呈先降低后升高趋势, 因为螺旋输送机转速过高、甩种盘转速及飞行速度太低会导致排种量大或种子撒播不出去, 单位面积撒种量多; 螺旋输送机转速太低、甩种盘转速及飞行速度太高又会致排种量小或撒播幅宽太宽, 单位面积撒种量小, 都会造成单位面积撒种量误差  $Y_2$  增加。

由图 11 可知, 排种机构螺旋输送机转速 A 取  $A_1$  时, 撒播均匀性变异系数  $Y_1$  最小,  $Y_1$  越小说明撒播越均匀, 因此对  $Y_1$  来讲 A 取  $A_1$  时最佳; 对单位面积撒种量误差  $Y_2$  而言, 排种机构螺旋输送机转速 A 取  $A_2$  时,  $Y_2$  最小,  $Y_2$  越小说明单位面积撒种量越准确, 因此对  $Y_2$  来讲 A 取  $A_2$  时最佳。以此类推, 撒播均匀性变异系数  $Y_1$  最优方案为  $A_1B_3C_2$ , 而单位面积撒种量误差  $Y_2$  最优方案为  $A_2B_2C_2$ , 两个指标的最优方案不一致, 且两组试验均未出现在表 4 正交试验的 9 组试验中。为得出最终的最优方案, 采用模糊综合评价法对试验结果进一步评分分析<sup>[34]</sup>。

进行模糊综合评价前首先需确定评价指标集和

为更清晰直观地分析各因素对评价指标的影响规律, 用图 11 折线图来直观表示。由图 11 可知, 撒播均匀性变异系数  $Y_1$  随着因素 A 转速的增加而升高, 因为排种机构螺旋输送机转速越高, 排种量就越大, 流入甩种盘的种子就越多, 在甩种盘转速不增加的情况下, 会造成种子撒播较密集集中, 使得撒播均匀性变异系数升高; 随着甩种盘转速的增加而降低, 因为甩种盘转速越高, 可及时将种子撒播出去, 从而撒播均匀性变异系数降低; 随着飞行速度增加先降低后升高, 因为飞行速度过慢, 抛撒种子太过密集, 飞行速度过快, 种子又太过稀疏, 因此需根据排种机构螺旋输送机转速和甩种盘转速选择合适的飞行速度, 以实现种子均匀抛撒。

对象集, 其次建立隶属函数和确定权重分配集, 最后计算模糊综合评价值, 并对模糊综合评价值进行分析。以撒播均匀性变异系数  $Y_1$  和单位面积撒种量误差  $Y_2$  为评价指标, 正交设计的 9 组试验确定评价对象集。因两个评价指标均为偏小型指标, 即越小越好, 因此隶属函数为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{19} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{29} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中  $r_{in} = \frac{Y_{i\max} - Y_{in}}{Y_{i\max} - Y_{i\min}}$  ( $i = 1, 2; n = 1, 2, \dots, 9$ ) (11)

结合实践经验并从实际分析出发, 确定权重分配集  $P = (0.55, 0.45)$ , 即撒播均匀性较单位面积撒种量误差更重要。由隶属函数 R 和权重分配集 P 确定模糊综合评价值集 W, 其中  $W = PR = (W_1, W_2, \dots, W_9)$ , 结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 第 5 号试验评分最高, 即  $A_2B_2C_3$ , 不能确定该处理是最佳试验方案, 还需对评分结果进一步进行极差直观分析, 极差分析结果表明, 最优试验方案为  $A_2B_2C_2$ , 因该试验方案不在正交试验 9 组试验中, 为确保试验准确性, 对试验方案

$A_2B_2C_2$ 再开展验证试验。表明试验方案为  $A_2B_2C_2$  时,撒播均匀性变异系数  $Y_1$  为 28.47%、单位面积撒种量误差  $Y_2$  为 11.81%,结果优于评分最高的  $A_2B_2C_3$  方案,从而可以确定最优的试验方案为  $A_2B_2C_2$ ,即排种机构螺旋输送机转速为 190 r/min、甩种盘转速为 1700 r/min、飞行速度为 5 m/s。



图 12 田间撒播试验及作业效果

Fig. 12 Field experiment and work effect

## 4 田间验证试验

在安徽省芜湖市南陵县青弋江种业基地开展水稻收割前紫云英无人机撒播田间验证试验,天气晴,东北风 2~3 级,试验田面积 1.8 hm<sup>2</sup>。试验物料与方法同 3.2 节,田间放置取样盒的位置将水稻连根拔掉。排种机构螺旋输送机转速、甩种盘转速、无人机飞行速度分别设定为 190 r/min、1700 r/min、5 m/s 时,测得田间试验结果,并计算与场地试验结果的相对偏差及田间试验结果的相对平均偏差,如表 6 所示。可知测得田间撒播均匀性变异系数最大为 30.42%,最小为 26.88%,均值为 28.60%,与性能试验平均相对误差为 3.64%;田间单位面积撒种量最大误差为 12.54%,最小为 11.32%,均值为 12.03%,与性能试验平均相对误差为 3.45%。

表 6 田间试验结果

Tab. 6 Results of field test %

取样点	撒播均匀性变异系数			单位面积撒种量误差		
	场地试验结果	田间结果	相对误差	场地试验结果	田间结果	相对误差
1		30.42	6.85		12.54	6.18
2		29.51	3.65		12.48	5.67
3	28.47	26.88	5.58	11.81	12.31	4.23
4		28.98	1.79		11.32	4.15
5		27.19	4.50		11.49	2.71
均值		28.60	3.64	均值	12.03	3.45

图 12 为田间撒播作业以及水稻收获后紫云英出苗情况,整体出苗良好。

## 5 结论

(1) 针对水稻收获前稻田和丘陵山区地带播种绿肥存在机具下田难,以及人工撒播劳动强度大的难题,基于农用多旋翼无人机平台,研制出方便与多品牌无人机组配的离心甩盘式绿肥种子撒播装置,可实现紫云英、二月兰等小粒绿肥种子高效、准确、均匀撒播。

(2) 离心甩盘式绿肥种子撒播装置主要由挂接机构、种箱、排种机构、撒播机构以及撒播自动控制系统构成,控制系统可通过控制排种机构螺旋输送机转速来调整排种量,根据不同绿肥品种选定不同甩种盘转速,实现绿肥种子定量排种、均匀撒播。

(3) 紫云英撒播试验结果表明,绿肥种子撒播装置排种机构螺旋输送机转速  $A$ 、甩种盘转速  $B$  以及无人机飞行速度  $C$  对撒播均匀性变异系数  $Y_1$  和单位面积撒种量误差  $Y_2$  都有显著影响。影响撒播均匀性变异系数  $Y_1$  的次要因素为  $B$ 、 $A$ 、 $C$ ,最佳因素水平组合为  $A_1B_3C_2$ ;影响单位面积撒种量误差  $Y_2$  次要因素为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ,最佳因素水平组合为  $A_2B_2C_2$ ;通过模糊综合评价法得出相对最佳因素水平组合为  $A_2B_2C_2$ ,即  $A$  为 190 r/min、 $B$  为 1700 r/min、 $C$  为 5 m/s 时,相应的撒播均匀性变异系数  $Y_1$  为 28.47%,单位面积撒种量误差  $Y_2$  为 11.81%。

(4) 开展了田间验证试验,在飞行高度为 2 m,在最优参数组合下,测得撒播均匀性变异系数均值为 28.60%,与性能试验平均相对误差为 3.64%;单位面积撒种量误差均值为 12.03%,与性能试验平均相对误差为 3.45%,后期田间出苗整齐。

## 参 考 文 献

- [1] GAO Songjuan, ZHOU Guopeng, ROBERT M R, et al. Green manuring inhibits nitrification in a typical paddy soil by changing the contributions of ammonia-oxidizing archaea and bacteria[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 156: 103698.
- [2] LIANG Hao, LI Shun, ZHANG Lei, et al. Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105369.
- [3] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461. CAO Weidong, BAO Xingguo, XU Changxu, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1450-1461. (in Chinese)
- [4] ZHOU Chunhuo, ZHAO Zunkang, PAN Xiaohua, et al. Integration of growing milk vetch in winter and reducing nitrogen fertilizer application can improve rice yield in double-rice cropping system[J]. Rice Science, 2016, 23(3): 132-143.
- [5] TEJADA M, GONZALEZ J L, GARCÍA-MARTÍNEZ A M, et al. Application of a green manure and green manure composted with

- beet vinasse on soil restoration: effects on soil properties[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 4949–4957.
- [6] 吴惠昌, 游兆延, 高学梅, 等. 我国绿肥生产机械发展探讨及对策建议[J]. *中国农机化学报*, 2017, 38(11): 24–29.  
WU Huichang, YOU Zhaoyan, GAO Xuemei, et al. Discussion and countermeasures on development of green manure production machinery in China[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2017, 38(11): 24–29. (in Chinese)
- [7] 游兆延, 吴惠昌, 高学梅, 等. 水田绿肥无人机装备技术研究与应用[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(2): 314–317, 321.  
YOU Zhaoyan, WU Huichang, GAO Xuemei, et al. Study and application of unmanned aerial vehicle in green manure in the paddy field[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(2): 314–317, 321. (in Chinese)
- [8] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(11): 1–20.  
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 1–20. (in Chinese)
- [9] 林多胡, 顾荣申. 中国紫云英[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 2000.
- [10] 刘彩玲, 何春梅, 王利民, 等. 紫云英作为饲草和绿肥综合利用价值的研究[J]. *草地学报*, 2020, 28(3): 857–862.  
LIU Cailing, HE Chunmei, WANG Limin, et al. The study on comprehensive value of Chinese milk vetch as forage and green manure[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(3): 857–862. (in Chinese)
- [11] NY/T 3840—2021 南方稻田绿肥种植与利用技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [12] 曹卫东, 徐昌旭. 中国主要农区绿肥作物生产与利用技术规程[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- [13] 王术波, 陈建, 彭兵忠. 我国农用无人机产业链分析[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(3): 131–139.  
WANG Shubo, CHEN Jian, PENG Bingzhong. Analysis on the industrial chain of agricultural unmanned aerial vehicles in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(3): 131–139. (in Chinese)
- [14] 孙健, 倪训友. 无人机国内外发展态势及前沿技术动向[J]. *科技导报*, 2017, 35(9): 109.
- [15] 陈博. 水稻种肥一体化精量直播无人机: CN209795833U[P]. 2019–12–17.
- [16] 陈博. 模块化可快速更换的农用无人机撒播装置: CN206433622U[P]. 2017–08–25.
- [17] 李遗. 一种超低空遥控飞行播种施肥机: CN205418091U[P]. 2016–08–03.
- [18] 彭冬星. 无人机搭载的水稻撒播机研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.  
PENG Dongxing. Study on a rice spreader based on UAV[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [19] 宋灿灿, 周志艳, 罗锡文, 等. 农业物料撒播技术在无人直升机中应用的思考[J]. *农机化研究*, 2018, 40(9): 1–9.  
SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, LUO Xiwen, et al. Review of agricultural materials broadcasting application on unmanned helicopter[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(9): 1–9. (in Chinese)
- [20] 张青松, 张恺, 廖庆喜, 等. 油菜无人机飞播装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(14): 138–147.  
ZHANG Qingsong, ZHANG Kai, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of rapeseed aerial seeding device used for UAV[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(14): 138–147. (in Chinese)
- [21] 黄小毛, 徐胡伟, 张顺, 等. 油菜成条飞播装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 78–87.  
HUANG Xiaomao, XU Huwei, ZHANG Shun, et al. Design and experiment of a device for rapeseed strip aerial seeding[J]. *Transactions of the CSAE*, 2020, 36(5): 78–87. (in Chinese)
- [22] 罗锡文, 李继宇, 周志艳, 等. 一种适于无人机撒播作业的机载装置及撒播方法: CN104176254A[P]. 2014–12–03.
- [23] 高学梅, 吴惠昌, 游兆延, 等. 一种绿肥种子无人机定量播撒装置及定量播撒方法: CN111284698A[P]. 2020–06–16.
- [24] 王鹰. 连续输送机械设计手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [25] NY/T 3881—2021 遥控飞行播种机 质量评价技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [26] 袁雪, 祁力钧, 王虎, 等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 45–50, 54.  
YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4): 45–50, 54. (in Chinese)
- [27] 施印炎, 陈满, 汪小岳, 等. 离心匀肥罩式水稻地表变量撒肥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 86–93, 113.  
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable-rate fertilizer spreader with centrifugal distribution cover for rice paddy surface fertilization[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 86–93, 113. (in Chinese)
- [28] 任万军, 吴振元, 李蒙良, 等. 水稻无人机撒肥系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 88–98.  
REN Wanjun, WU Zhenyuan, LI Mengliang, et al. Design and experiment of UAV fertilization spreader system for rice[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 88–98. (in Chinese)
- [29] 赵山志, 万战军. 9SB–4 型电动式牧草种子撒播机[J]. *粮油加工与食品机械*, 1990(6): 30–32.
- [30] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [31] 冯国生, 吕振通, 胡博, 等. SPSS 统计分析与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [32] 刘智峰, 李旭. 改性花生壳吸附废水中 Cr(VI) 条件的优选试验[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(29): 16498–16500.
- [33] 刘小云, 付玉兰. SPSS13.0 在椒树组培  $L_9(3^4)$  正交试验数据处理中的应用[C]// 中国园艺学会观赏园艺专业委员会 2009 年全国观赏园艺年会论文集, 临安: 中国林业出版社, 2009: 215–218.
- [34] 吴德林, 周云飞. 高速铣削切削参数的模糊正交优化方法[J]. *机械工程师*, 2008(8): 91–93.