

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.11.022

双通道斜置式撒肥叶片单圆盘离心式变量撒肥机设计与试验

周文琪 刘淮玉 李郡凯 路衢 王奇 王一甲

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 撒肥是农业生产的重要环节,提高撒肥均匀性在保证作物产量与品质的同时也减少对环境造成的污染。针对单通道直线式撒肥叶片撒出肥料分布均匀性差等问题,设计了一种双通道斜置式撒肥叶片的单圆盘离心式变量撒肥机,采用模糊 PID 算法开发双变量撒肥控制系统,可依据实时信息实现落肥量与撒肥幅宽的同时调节。通过分析肥料颗粒在叶片前端、后端和空气中的受力情况,构建肥料颗粒运动学模型,确定叶片最佳参数,以实现肥料均匀分布。基于离散元法建立撒肥仿真模型,分别进行单因素试验与正交试验并进行响应面分析。试验结果表明:在落肥口开度 8° ,叶片偏角 0.42° ,叶片斜角 16.22° ,圆盘转速 450 r/min ,前进速度 1.1 m/s 时,肥料分布状态达到最佳,此时肥料分布均匀性变异系数为 18.7% ,撒肥有效幅宽为 10.96 m 。进行台架试验与田间试验,对仿真试验结果与双变量撒肥控制系统性能进行验证,结果表明:台架试验与仿真试验的肥料分布均匀性变异系数平均误差为 0.24% ,说明离散元法可准确模拟撒肥过程;肥料分布均匀性变异系数为 24.5% ,肥料施用控制精度为 90.7% ,总排肥量稳定性系数为 94.6% ,单位面积施肥量误差为 19.8% ,满足农艺要求。该研究结果为提高撒肥均匀性及精准变量施肥技术研究提供重要参考。

关键词: 撒肥机; 双通道斜置式撒肥叶片; 双变量撒肥控制系统; 仿真模型

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0257-12 OSID: 

Design and Experiment of Single-disc Centrifugal Variable-rate Fertilizer Spreader with Double-channel Inclined Spreading Blades

ZHOU Wenqi LIU Huaiyu LI Junkai LU Qu WANG Qi WANG Yijia

(School of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Fertilizer spreading is a crucial part of agricultural production. Improving spreading uniformity can ensure crop yield and quality while reducing environmental pollution. To address the poor uniformity of fertilizer distribution when spread by the single-channel linear type spreading blades, a single-disc centrifugal variable rate fertilizer spreader based on double-channel inclined spreading was designed. A double-variable fertilizer spreading control system was developed by using the fuzzy PID algorithm, which can adjust the fertilizer application rate and spread width simultaneously according to real time information. A complete kinematic model was constructed by analyzing the fertilizer particles at the front and rear of the blades and in the air, and optimum blade parameters were determined to achieve the most uniform fertilizer distribution. A fertilizer spreading simulation model was established based on the discrete element method, and single-factor tests, orthogonal tests, and response surface analysis were carried out. The test results showed that when the fertilizer outlet opening was 8° , the blade deflection angle was 0.42° , the blade inclination angle was 16.22° , the disc rotation speed was 450 r/min , and the forward speed was 1.1 m/s , the fertilizer distribution reached the best state. At this time, the coefficient of variation of fertilizer distribution was 18.7% , and the effective spreading width was 10.96 m . Bench tests and field tests were conducted to verify the simulation test results and the performance of the double-

收稿日期: 2025-02-05 修回日期: 2025-04-30

基金项目: 黑龙江省自然科学基金非共识项目(FG2025C001)、国家重点研发计划项目(2022YFD2001401-02、2023YFD1500401-04)和黑龙江省自然科学基金研究团队项目(TD2023E001)

作者简介: 周文琪(1989—),男,教授,博士,主要从事田间作业机械研究,E-mail: zhouwenqi1989@163.com

通信作者: 王一甲(1995—),男,教授,博士,主要从事智慧农业研究,E-mail: yijia@neau.edu.cn

variable fertilizer spreading control system. The results showed that the average error in the coefficient of variation for fertiliser distribution uniformity between the bench test and the simulation test was 0.24% , indicating that the discrete element method can accurately simulate the fertilizer spreading process. The coefficient of variation of fertilizer distribution uniformity was 24.5% , the fertilizer application control accuracy was 90.7% , the total fertilizer discharge stability was 94.6% , and the error of fertilizer application per unit area was 19.8% , meeting the agronomic requirements. The research results can provide an important reference for improving fertilizer spreading uniformity and studying precise variable rate fertilization technology.

Key words: fertilizer spreader; double-channel inclined fertilizer spreading blades; double-variable fertilizer spreading control system; simulation model

0 引言

合理施用化肥可促进作物生长,但过量使用会破坏土壤生态、威胁水生态平衡^[1-3]。撒肥是组成农业生产的关键环节之一,具有生产成本低、作业效率高优点,不过在对撒肥机的实际操作中,难以精准控制单位面积地块施肥量,且该种施肥方式对肥料分布均匀性要求较高。

现有单圆盘离心式撒肥机的整体结构已经比较成熟,且国内外学者也对精准变量施肥技术展开了深入研究。国外 PRZYWARA 等^[4]针对现有单圆盘离心式撒肥装置,探究了不同工作参数组合对不同种类肥料分配状态影响规律;SEOK-JOON 等^[5]对现有撒肥机的落肥口位置进行优化,研究了不同偏转角度下落肥口位置对作业区域两侧肥料质量分布状态的影响,以此提高肥料分布均匀性;AHMED 等^[6]研发了一种颗粒肥变量施用控制系统,并对不同工况下的施肥量误差与系统响应时长进行统计,但控制精度有待提高;国内张国忠等^[7]设计了一种藕田侧抛式撒肥机,探究了肥料喂入速率等因素对肥料分布状态的影响规律;FAN 等^[8]设计了一种针对温室蔬菜的侧抛式撒肥机,分别研究观察了不同因素下肥料的射流轨迹与其在圆盘上的分布状态,试验结果表明该侧抛撒肥机可满足温室蔬菜的施肥要求。施印炎等^[9]设计了一种基于水稻光谱传感技术的变量施肥智能控制系统,该机可基于实时获取的水稻生长信息进行专家智能决策,实现精准变量按需施肥。GAO 等^[10]提出了一种排肥轴自适应控制策略,通过构建不同区域排肥轴与电机控制信号的关系模型实现对施肥量的精准控制。

综上所述,先前对撒肥装置的相关研究中缺少对撒肥叶片这一关键部件的创新性结构设计,而均采用原始的单通道直线式撒肥叶片配置,这导致撒出肥料分布均匀性较差。故本研究设计一种双通道斜置式撒肥叶片结构,通过降低撒肥脉动性,

提升肥料分布均匀性,并利用离散元法 (DEM) 开展撒肥仿真试验,探究撒肥装置相关参数对肥料分布均匀性和撒肥幅宽的影响规律。此外,现有变量施肥控制系统多依赖处方图进行施肥,流程冗杂且成本高^[11-13],且变量施肥作业过程中的肥料分布均匀性有待提高。因此本文将设计一种基于实时信息参数实现在线调节的双变量撒肥控制系统,依据理论施肥量和前进速度,同步调节落肥量与撒肥幅宽,提高系统控制精度,保证田间肥料均匀分布。

1 撒肥装置结构与工作原理

1.1 装置结构

本文研制的单圆盘离心式撒肥机具体结构如图 1 所示。

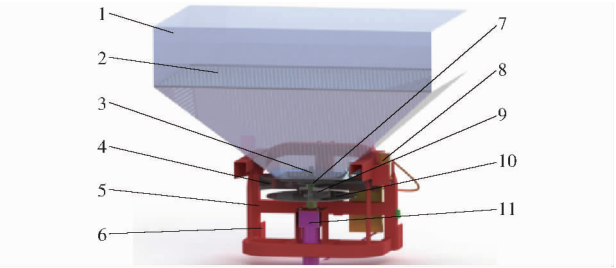


图 1 单圆盘离心式变量撒肥机结构图
Fig.1 Single-disc centrifugal variable rate fertilizer spreader
1. 肥箱 2. 振动筛 3. 搅拌机构 4. 挡肥板 5. 机架 6. 三点悬挂 7. 落肥量调节机构 8. 步进电机 9. 撒肥叶片 10. 撒肥圆盘 11. 直流减速电机

其中落肥量调节机构由步进电机经同步带-齿轮传动机构驱动旋转,通过改变落肥口重叠面积调控落肥量。撒肥圆盘在落肥量调节机构下方同轴安装,盘上配有一组两片叶片,手动调叶片偏角可改变撒肥幅宽。该离心圆盘式撒肥机可在大田上实现快速、均匀地撒肥,作业效率高,且结构简单、操作方便、成本低,适用于各类农业场景。

1.2 工作原理

施肥作业启动后,直流减速电机带动撒肥圆盘

高速旋转,系统控制步进电机打开落肥口,肥料下落至圆盘,肥料做圆周运动后被刮入双通道斜置式撒肥叶片内,在离心力作用下沿设定方向斜抛而出。叶片两通道中撒出肥料呈半圆环状,均匀散落于地面,撒肥机行进时肥料逐步向前覆盖,实现对大田的高效施肥。

2 撒肥叶片结构设计

2.1 肥料颗粒运动学模型构建

撒肥叶片是撒肥装置的关键核心部件。针对单通道直线式撒肥叶片撒出肥料分布均匀性差等问题,本文设计了一种双通道斜置式撒肥叶片结构,其由主体、安装条、上沿、下沿及中间隔板组成,如图 2 所示。叶片总高度为 H ,叶片上通道高度为 h_1 ,叶片下通道高度为 h_2 ,上通道前端长度为 L_1 ,后端长度为 L_2 ,下通道前端长度同样为 L_1 ,后端长度为 L_3 ,叶片上沿、下沿以及中间隔板的宽度为 d_1 ,安装条宽度为 d_2 。叶片前端呈直线型、后端呈斜线型,可使肥料斜抛于空中,延长运动时间,增大抛撒距离。叶片内部由中间隔板划分为上、下两个通道,下通道略长,其内部肥料加速时间长、抛射更远。撒肥叶片旋转一周,肥料呈两个半圆环状从叶片后端撒出,随拖拉机前进逐圈均匀覆盖。

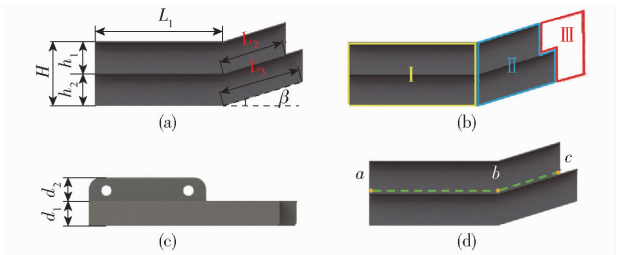


图 2 双通道斜置式撒肥叶片结构示意图
Fig.2 Schematics of double-channel inclined fertilizer spreading blade

为提高肥料分布均匀性,设计合理的叶片结构尺寸至关重要,以肥料颗粒的整个抛撒过程为研究对象进行分析,具体可划分为 3 个阶段,如图 2b 所示:第 1 阶段为肥料颗粒在叶片前端上的加速运动(区域 I);第 2 阶段为肥料颗粒在叶片后端上、下通道上的加速运动(区域 II);第 3 阶段为肥料颗粒离开叶片后在空气中的斜抛减速运动(区域 III)^[14-16]。

2.1.1 第 1 阶段肥料颗粒受力分析

第 1 阶段,肥料从落肥口落下后,在做高速圆周运动的撒肥叶片下刮至内部两通道内,肥料在离心力作用下于叶片前端加速。以图 2d 通道内加速肥料颗粒为例,点 a 至点 b 为肥料颗粒在叶片前端的运动,点 b 至点 c 为在叶片后端的运动。假设肥料

颗粒被刮至叶片前端点 a 时水平速度为零,此时肥料颗粒受重力 G 、离心力 F_c 、科里奥利力 F_{cor} 、叶片下沿支持力 F_{N1} 、叶片主体支持力 F_{N2} 和总摩擦力 F_f 共 6 个力作用。如图 3 所示,对第 1 阶段肥料颗粒受力进行分析可得

$$\begin{cases} G = mg \\ F_c = m\omega^2 r \\ F_{N1} = G = mg \\ F_{N2} = F_{cor} - F_c \sin \alpha = 2m\omega v \cos \beta - m\omega^2 r \sin \alpha \\ F_{cor} = 2m\omega v \cos \beta \\ F_{f1} = \mu F_{N1} = \mu mg \\ F_{f2} = \mu F_{N2} = 2\mu m\omega v \cos \beta - \mu m\omega^2 r \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中 m ——肥料颗粒质量, kg
 ω ——撒肥圆盘的旋转角速度, rad/s
 r ——肥料颗粒与撒肥圆盘中心距离, mm
 μ ——肥料颗粒与叶片之间动摩擦因数
 α ——撒肥叶片在撒肥圆盘上偏转角, ($^\circ$)
 β ——撒肥叶片后端斜置角, ($^\circ$)
 v ——肥料颗粒与圆盘之间相对速度, mm/s
 F_{f1} ——叶片前端对肥料颗粒的摩擦力, N
 F_{f2} ——叶片后端对肥料颗粒的摩擦力, N
 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

肥料在叶片前端运动时的平衡方程式为

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F_c \cos \alpha - F_{f1} \quad (2)$$

式中 t ——肥料颗粒运动到点 b 所需时间, s
该肥料颗粒运动到点 b 时的速度 V_b 可表示为
$$V_b = \sqrt{2L_1(\omega^2 r \cos \alpha - \mu g - 2\mu \omega v + \mu \omega^2 r \sin \alpha)} \quad (3)$$

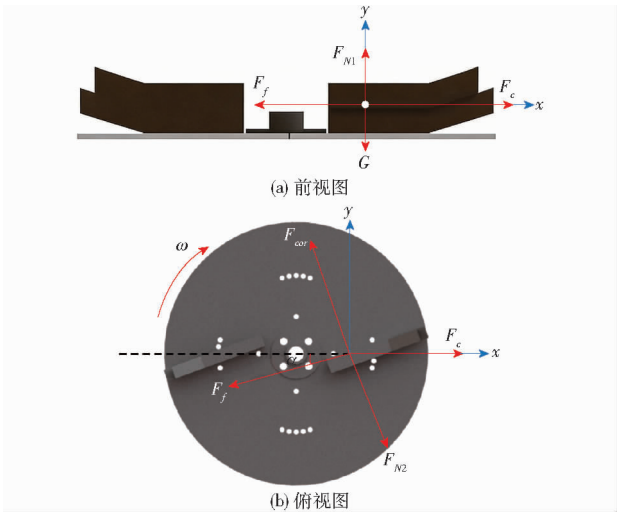


图 3 第 1 阶段肥料颗粒受力分析

Fig.3 Force analysis of fertilizer particles in the first stage

2.1.2 第 2 阶段肥料颗粒受力分析

第 2 阶段,肥料颗粒在叶片前端加速后进入后

端,此时下沿提供的支持力 F_{N1} 与总摩擦力 F_f 方向均发生改变。图 4 为该阶段肥料颗粒受力示意图,受力平衡方程为

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} \cos \alpha = F_c \cos \alpha \cos \beta - F_{f2} \quad (4)$$

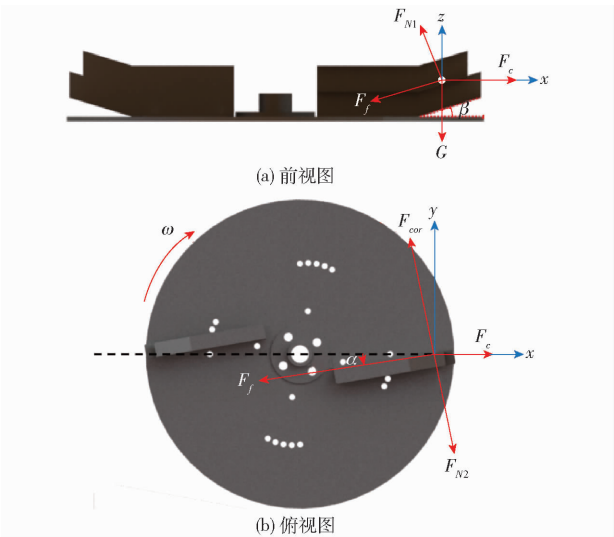


图 4 第 2 阶段肥料颗粒受力分析
Fig.4 Force analysis of fertilizer particles in the second stage

肥料颗粒从叶片上通道后 endpoint c 抛出时的速度 V_c 可表示为

$$\begin{aligned} V_c = & 2\omega^2 r (L_1 \cos \alpha + L_1 \mu \sin \alpha + \\ & L_2 \cos \alpha \cos \beta - L_2 \mu \sin \beta + L_2 \mu \sin \alpha) - \\ & 2g(\mu L_1 + L_2 \sin \beta + L_2 \mu \cos \beta) - 4\mu \omega v (L_1 + L_2 \cos \beta) \end{aligned} \quad (5)$$

2.1.3 第 3 阶段肥料颗粒受力分析

第 3 阶段,肥料颗粒经叶片加速后被抛至空中,在重力 G 、空气阻力 F_x 和 F_y 作用下做减速运动。图 5 为该阶段肥料颗粒受力示意图,蓝色轨迹为叶片下通道肥料的运动轨迹与覆盖区,红色轨迹为叶片上通道的情况, H' 为撒肥盘离地高度, x_1 、 x_2 、 x_3 分别为撒肥盘中心与叶片上通道撒出肥料覆盖区中心的距离、撒肥盘中心与叶片下通道撒出肥料覆盖区中心的距离、此刻与下一刻叶片下通道撒出肥料覆盖区中心的距离。从 x 与 y 方向建立肥料颗粒的运动方程,即

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_x \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = -mg - F_y \end{cases} \quad (6)$$

式中 $d^2 x/dt^2$ ——肥料在 x 方向上瞬时加速度, m/s^2
 $d^2 y/dt^2$ ——肥料在 y 方向上瞬时加速度, m/s^2

通常认为肥料颗粒所受到的空气阻力与其运动速度成正比^[17]。因此肥料颗粒在 x 与 y 方向所受

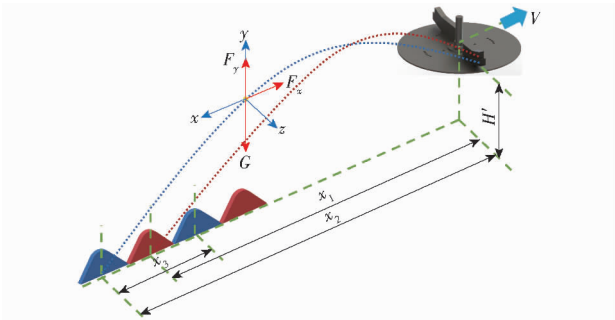


图 5 第 3 阶段肥料颗粒受力分析
Fig.5 Force analysis of fertilizer granules in the third stage

到的空气阻力可分别表达为

$$\begin{cases} F_x = \frac{1}{2} \rho_\alpha CS \frac{dx}{dt} \\ F_y = \frac{1}{2} \rho_\alpha CS \frac{dy}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

式中 C ——空气阻力系数
 ρ_α ——空气密度, kg/m^3
 S ——颗粒迎风面积, m^2
 dx/dt ——肥料颗粒在 x 方向上瞬时速度, m/s
 dy/dt ——肥料颗粒在 y 方向上瞬时速度, m/s

由于在垂直方向上 dy/dt 值较小,为简化计算,可忽略颗粒在垂直方向上受到的空气阻力。经过对式(6)进行积分计算,肥料颗粒在 x 方向上的运动距离可最终表示为

$$x = \frac{2m}{\rho_\alpha CS} v_0 \cos \beta (1 - e^{-\frac{\rho_\alpha CS}{2m} \frac{\sqrt{v_0^2 \sin^2 \beta + (H')^2}}{g}}) \quad (8)$$

式中 v_0 ——肥料颗粒抛出时的初始速度, m/s

2.1.4 叶片长度对肥料颗粒稳定性分析

撒肥叶片长度通过改变肥料颗粒旋转半径,进而影响离心力大小。较大离心力会影响肥料颗粒运动稳定性,导致其出现滑动、滚动等不规则运动,降低撒肥的准确性与均匀性。为此,本文设计多组仿真预试验,测量不同叶片长度下肥料颗粒的平均抛撒距离,同时依据式(8)计算出颗粒相应理论抛撒距离,同时对理论与仿真抛撒距离之间误差进行分析,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,随着叶片前、后端长度增加,肥料颗粒抛撒距离变远,但仿真与理论抛撒距离的误差也增大。当叶片前端长度小于等于 120 mm、后端长度小于等于 60 mm 时,误差率处于 9.8% ~ 13.4% 的较低水平,此时肥料颗粒运动稳定性高,叶片长度设计较为合理。

2.2 撒肥叶片尺寸设计

因该撒肥叶片下通道后端长度 L_3 比上通道后端长度 L_2 略长,下通道肥料颗粒受离心力加速时间更长,使得下通道抛出肥料颗粒速度更快、距离更远。

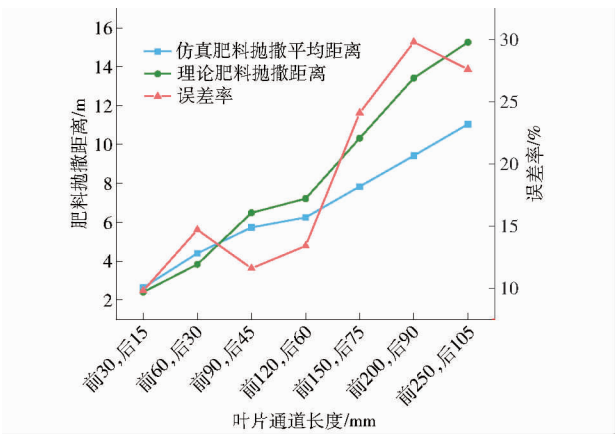


图 6 不同叶片长度下肥料颗粒抛撒距离
Fig.6 Dispersion distances of fertilizer particles
with regard to blades of varying lengths

单个撒肥叶片旋转一周,肥料从上、下通道以两个有间距的半圆环状轨迹抛撒,随机具前进逐圈向前覆盖,为提高肥料分布均匀性,设计目标为使叶片上通道撒出肥料的红色覆盖区尽量处于此刻与下一刻叶片下通道撒出肥料两个蓝色覆盖区之间,因此有

$$\begin{cases} N = \frac{x_3}{2(x_2 - x_1)} \times 100\% \\ x_3 = \frac{60\pi v'}{\omega} \end{cases} \quad (9)$$

式中 N ——衡量红色肥料覆盖区位于两个蓝色肥料覆盖区中间的程度,如 N 值为 50% 代表红色区恰好位于两个蓝色区中间

v' ——机具前进速度, m/s

综合式(8)与式(9),红色肥料覆盖区占中间程度 N 最终表达式为

$$N = \frac{15\pi\rho_\alpha C S v'}{\omega m \cos\beta (1 - e^{-\frac{\rho_\alpha C S}{2m} \frac{\sqrt{v_\beta^2 \sin^2\beta + (H')^2}}{g}}) (V'_c - V_c)} \quad (10)$$

式中 V'_c ——叶片下通道肥料抛出时初始速度, m/s

为使肥料分布均匀性较佳,应尽量使 N 取在 30% ~ 70% 之间,结合现有撒肥叶片的结构尺寸,双通道斜置式撒肥叶片的最终结构尺寸设计为:叶片总高度 H 为 55 mm,上通道高度 h_1 与下通道高度 h_2 均为 26 mm;上、下沿与中间隔板宽度 d_1 为 20 mm,安装条宽度 d_2 为 15 mm;撒肥叶片前端长度 L_1 为 110 mm,撒肥叶片上通道后端长度 L_2 为 55 mm,撒肥叶片下通道后端长度 L_3 为 70 mm。

3 控制系统设计

图 7 所示为双变量撒肥控制系统整体设计方案。该系统由混合测速、双变量调控、电机反馈、人机交互、监测报警 5 个模块构成,采用 stm32f407 作为中央处理器。其核心目标为实现精准撒肥,依据农田不同区域肥力及作物生长情况,结合机具不同前进作业速度,精准控制撒肥量与撒肥幅宽,使目标地块单位面积施肥量达理论值,提升肥料利用率。

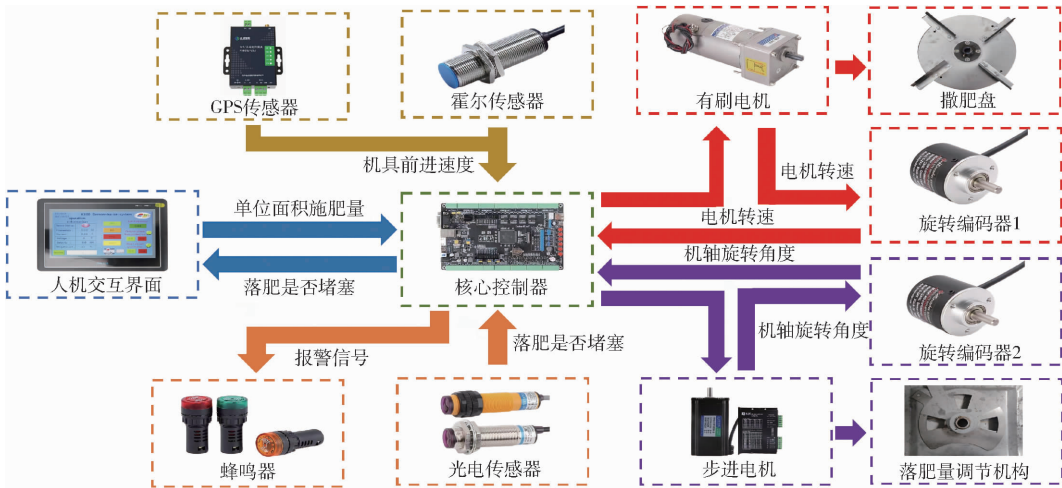


图 7 双变量撒肥控制系统原理图
Fig.7 Schematic of bivariate fertilizer spreading control system

该系统数学模型表达单位面积施肥量、前进速度、落肥量和撒肥幅宽的关系,即

$$M' = qv'W' \quad (11)$$

式中 M' ——单位时间内落肥量, g/s
 q ——输入的单位面积地块施肥量, g
 W' ——撒肥幅宽, m

落肥量决定单位面积肥料投放量,由步进电机经同步带-齿轮传动机构带动落肥量调节机构转动,改变落肥口重叠面积实现精准控制。本文通过落肥静置试验拟合落肥口开度与落肥量关系,即

$$M' = 30.8 - 6.93L' + 2.38x_1^2 \quad (12)$$

式中 L' ——落肥口开度, $(^\circ)$

步进电机转角与落肥口开度比例关系为

$$k = 3.47L'$$
 (13)

式中 k ——步进电机转角, (°)

撒肥幅宽影响单位面积施肥量,由直流减速电机经同轴器-撒肥圆盘机构直接调节,经预试验拟合直流电机转速与撒肥幅宽关系,即

$$W' = -0.12 + 0.024n - 8.59E^{-6}n^2$$
 (14)

式中 n ——直流电机转速, r/min

E ——单位面积施肥量误差, %

撒肥作业时,操作人员在人机交互界面输入单位面积施肥量。GPS 传感器获取撒肥机地理位置信息,经串口通信将速度传至中央处理器;霍尔传感器检测车轮转动频率,以电信号传回并换算为前进速度。中央处理器结合权重确定机具前进速度,运用多目标遗传优化算法计算出落肥量与撒肥幅宽的最优值,在保证单位面积施肥量不变的同时使肥料分布变异系数最低。中央处理器依据式(12)、(13)计算出对应步进电机转角,获取最佳落肥量并发送角度指令;依据式(14)计算出对应直流电机转速,发送 PWM 占空比指令。两个旋转编码器分别与步进、直流电机轴同轴安装,监测电机转角和转速并反馈数据,中央处理器利用模糊 PID 算法调整电机,形成闭环控制,确保落肥量与撒肥幅宽的控制精度。光电传感器固定在落肥口,若检测不到肥料掉落,向中央处理器发送报警信号,蜂鸣器报警且人机交互界面显示落肥堵塞。

4 撒肥仿真试验

4.1 仿真试验设计

本研究中的撒肥仿真试验参照 ISO 5690 和 ASAE 341.2 规定的离心式圆盘撒肥机试验步骤^[18-19]进行。撒肥机以不同速度从 14 m × 13 m 的虚拟仿真区域中心驶过,如图 8 所示。

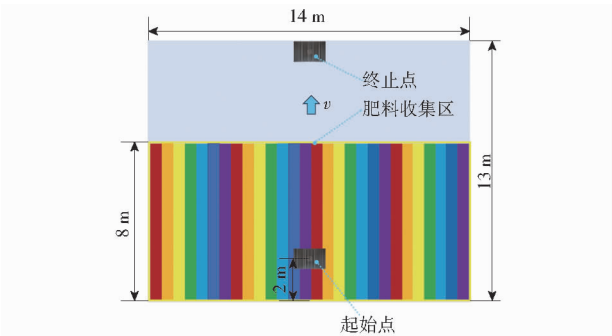


图 8 撒肥仿真试验区域示意图

Fig. 8 Schematic of fertilizer spreading simulation test region

将地面等分成 8 行 28 列,把每列地面颗粒质量叠加,得到 1 × 28 的肥料收集矩阵,以此表示撒肥机

以特定前进速度通过单行矩阵的撒肥量分布。肥料分布均匀性变异系数 (Coefficient of variation of fertilizer distribution uniformity, C_v) 和撒肥有效幅宽 W 作为衡量撒肥机作业性能的关键指标, C_v 计算公式为

$$C_v = \frac{D_s}{\bar{X}} \times 100\%$$
 (15)

其中

$$D_s = \left[\sum_{i=1}^{m_0} (X_i - \bar{X})^2 / (m_0 - 1) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} X_i$$

式中 D_s ——肥料质量分布标准差, g

X ——每列矩阵收集的肥料质量均值, g

X_i ——第 i 列矩阵内肥料颗粒质量和, g

m_0 ——肥料收集矩阵列数

C_v 需在撒肥有效幅宽内计算。撒肥有效幅宽 W 作为撒肥效果另一衡量指标,与撒肥机工作效率直接相关,其定义为作业区域两侧肥料分布量为峰值 1/2 的单个统计区域与肥料量峰值间距离之和。

4.2 单因素仿真试验

选取落肥口开度、叶片偏角、叶片斜角、圆盘转速和前进速度为试验因素。根据文献[20],叶片偏角在 -20° ~ 20° 内变化且增量为 10°;若叶片斜角过大将导致叶片后端撒出肥料轨迹与机架发生碰撞干涉,叶片斜角取值范围为 11° ~ 23°;通过仿真预试验确定圆盘转速范围为 300 ~ 500 r/min;因拖拉机挡位限制,选取前进速度为 0.7 ~ 1.5 m/s,在后续研究中有待更换动力源,探究低速度下肥料分布规律;根据实际作业施肥量需求^[21-22],落肥口最大流量设计为 1.2 kg/s,落肥口开度确定为 6° ~ 30°,进行五因素五水平单因素试验。

4.2.1 仿真模型可靠性验证

分别进行 25 组单因素撒肥台架试验与仿真试验,对比试验结果误差以验证构建仿真模型准确性,如图 9 所示。经计算,在 5 个因素的影响下,仿真试验与台架试验中测得 C_v 的误差分别为 0.11% ~ 0.18%、0.16% ~ 0.44%、0.08% ~ 0.24%、0.07% ~ 0.27% 与 0.17% ~ 0.27%,测得 W 的误差分别为 0.14 ~ 0.26 m、0.1 ~ 0.5 m、0.05 ~ 0.25 m、0 ~ 0.14 m 与 0 ~ 0.11 m,进一步说明仿真结果可靠性强,但台架试验中测得 C_v 有高于仿真中计算结果趋势,且测得 W 有低于仿真计算结果趋势,考虑台架试验中存在着风向与空气阻力等不可模拟因素,导致撒出的肥料颗粒抛撒距离近,肥料分布状态也将相应地发生改变。

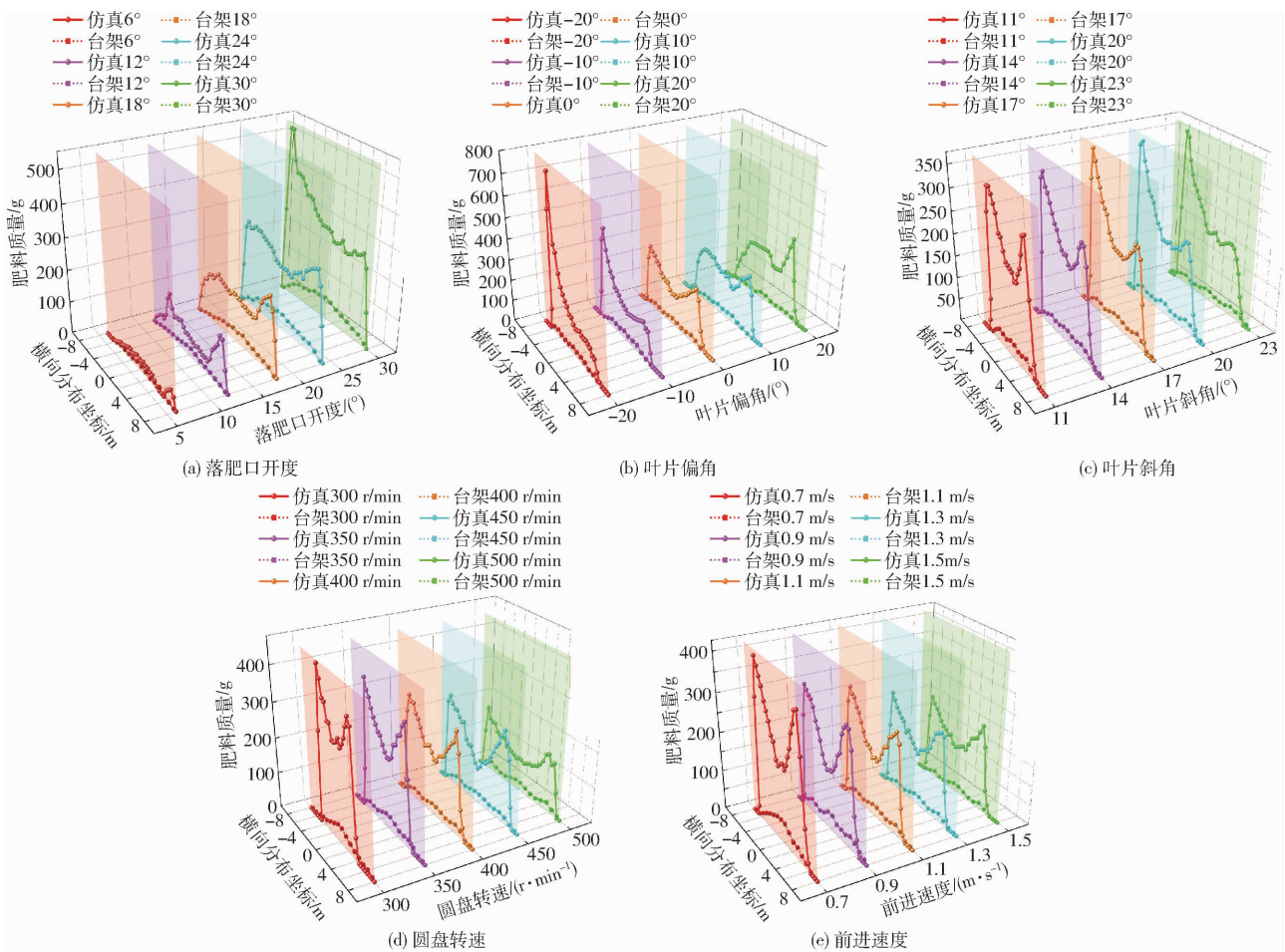


图 9 单因素试验下的肥料质量分布曲线

Fig. 9 Fertilizer quality distribution under one-factor test

4.2.2 单因素试验结果

通过相关试验探究了撒肥机不同参数对肥料分布的影响:落肥口开度从 6°增大到 30°时,肥料质量峰值从区域右侧移至左侧,开度为 6°时 C_v 达最大值,为 50.8%;开度为 24°时 C_v 降至最低,为 15.91%,且撒肥有效幅宽 W 最大,为 12.5 m;叶片偏角从 -20°增大到 20°,肥料质量峰值由区域左侧转至右侧,偏角 10°时横向肥料质量分布最平缓, C_v 最低,为 14.15%, W 最高,为 11.0 m;叶片斜角变化对肥料质量分布影响不大,斜角在 11°~23°时峰值在区域左侧,11°时 C_v 最低,为 20.37%,14°时 W 最大,为 11.5 m;圆盘转速增大,肥料质量分布从中心区域堆积转变为向更远距离分布,400 r/min 时 C_v 最低,为 17.3%,500 r/min 时 W 最大,为 13.5 m;前进速度从 0.7 m/s 增加到 1.5 m/s,肥料横向质量分布曲线逐渐下降且更平缓,0.7~1.1 m/s 时质量峰值较明显,1.3~1.5 m/s 时分布较平缓,1.3 m/s 时 C_v 最低,为 16.37%, W 为 11.0 m。

4.3 多因素试验

4.3.1 试验设计

在单因素仿真试验的基础上,以落肥口开度 A 、

前进速度 B 、叶片斜角 C 、叶片偏角 D 和圆盘转速 E 为试验因素,以肥料分布均匀性变异系数 C_v 和撒肥有效幅宽 W 为试验指标,设计正交试验,因素编码如表 1 所示,其中试验因素的取值范围根据单因素试验的分析结果进行适当选取与调整,试验方案及结果如表 2 所示。

表 1 正交试验因素编码
Tab.1 Orthogonal test factors and coding

编码	试验因素				
	$A/(^{\circ})$	$B/(m \cdot s^{-1})$	$C/(^{\circ})$	$D/(^{\circ})$	$E/(r \cdot min^{-1})$
-2	6	0.5	11	-20	300
-1	12	0.7	14	-10	350
0	18	0.9	17	0	400
1	24	1.1	20	10	450
2	30	1.3	23	20	500

4.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对正交试验结果进行分析与处理,其中肥料分布均匀性变异系数 C_v 的方差分析如表 3 所示,撒肥有效幅宽 W 的方差分析如表 4 所示。

去除对肥料分布均匀性变异系数影响不显著的

表 2 试验方案及结果

Tab.2 Experiment scheme and results							
序号	试验因素					C_v / %	W / m
	A / ($^{\circ}$)	B / ($m \cdot s^{-1}$)	C / ($^{\circ}$)	D / ($^{\circ}$)	E / ($r \cdot min^{-1}$)		
1	12	0.7	14	-10	450	26.78	10.5
2	24	0.7	14	-10	350	35.02	8.0
3	12	1.1	14	-10	350	32.38	8.5
4	24	1.1	14	-10	450	33.37	11.0
5	12	0.7	20	-10	350	35.02	8.0
6	24	0.7	20	-10	450	26.10	11.5
7	12	1.1	20	-10	450	23.46	11.0
8	24	1.1	20	-10	350	33.70	7.5
9	12	0.7	14	10	350	37.00	8.0
10	24	0.7	14	10	450	26.10	10.5
11	12	1.1	14	10	450	22.13	11.0
12	24	1.1	14	10	350	28.41	8.0
13	12	0.7	20	10	450	25.77	10.0
14	24	0.7	20	10	350	33.70	8.5
15	12	1.1	20	10	350	29.40	8.0
16	24	1.1	20	10	450	31.38	11.0
17	6	0.9	17	0	400	23.79	9.0
18	30	0.9	17	0	400	27.75	9.5
19	18	0.5	17	0	400	25.44	9.0
20	18	1.3	17	0	400	22.13	9.0
21	18	0.9	11	0	400	27.42	9.5
22	18	0.9	23	0	400	21.47	9.0
23	18	0.9	17	-20	400	38.98	8.5
24	18	0.9	17	20	400	35.36	8.5
25	18	0.9	17	0	300	33.37	6.0
26	18	0.9	17	0	500	26.76	12.5
27	18	0.9	17	0	400	19.16	9.0
28	18	0.9	17	0	400	16.85	9.5
29	18	0.9	17	0	400	18.83	9.5
30	18	0.9	17	0	400	19.82	8.5
31	18	0.9	17	0	400	17.51	9.0
32	18	0.9	17	0	400	18.17	9.5
33	18	0.9	17	0	400	17.84	9.0
34	18	0.9	17	0	400	18.50	9.0
35	18	0.9	17	0	400	20.81	8.5
36	18	0.9	17	0	400	16.52	9.0

试验因素,最终获得肥料分布均匀性变异系数与各试验因素的二次回归方程为

$$C_v = 424.32 - 7.27A - 147.19B - 6.31C - 0.39D - 1.15E + 1.81AB + 0.0068AE + 0.14BE + 0.033CD + 0.11A^2 + 30.63B^2 + 0.15C^2 + 0.05D^2 + 0.0011E^2 \quad (16)$$

表 3 表明,对肥料分布均匀性变异系数 C_v 影响极显著因素有 A 、 E 、 AB 、 AE 、 BE 、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 和 E^2 ; 对 C_v 影响显著因素有 B 、 D 和 CD 。对变异系数影响显著性由大到小因素依次为圆盘转速、落肥口开

表 3 肥料分布均匀性变异系数方差分析

Tab.3 ANOVA for coefficient of variation of fertilizer distribution					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 474.08	20	73.70	28.58	<0.000 1 **
A	23.52	1	23.52	9.12	0.008 6 **
B	13.32	1	13.32	5.17	0.038 2 *
C	8.83	1	8.83	3.43	0.084 0
D	15.33	1	15.33	5.94	0.027 7 *
E	164.12	1	164.12	63.65	<0.000 1 **
AB	33.47	1	33.47	12.98	0.002 6 **
AE	29.65	1	29.65	11.50	0.004 0 **
BE	31.47	1	31.47	12.21	0.003 3 **
CD	15.76	1	15.76	6.11	0.025 9 *
A^2	94.81	1	94.81	36.77	<0.000 1 **
B^2	48.02	1	48.02	18.62	0.000 6 **
C^2	61.83	1	61.83	23.98	0.000 2 **
D^2	668.68	1	668.68	259.32	<0.000 1 **
E^2	249.98	1	249.98	96.95	<0.000 1 **
残差	38.68	15	2.58		
失拟	22.99	6	3.83	2.20	0.138 8
误差	15.69	9	1.74		
总和	1 512.75	35			

注: ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$), * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$),下同。

表 4 撒肥有效幅宽方差分析

Tab.4 ANOVA for effective width of fertilizer spreading					
变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	49.86	20	2.49	42.40	<0.000 1 **
E	45.38	1	45.38	771.73	<0.000 1 **
AB	0.562 5	1	0.562 5	9.57	0.007 4 **
AC	0.250 0	1	0.250 0	4.25	0.057 0
AE	0.250 0	1	0.250 0	1.25	0.057 0
BC	0.250 0	1	0.250 0	4.25	0.057 0
BE	0.250 0	1	0.250 0	4.25	0.057 0
DE	0.250 0	1	0.250 0	4.25	0.057 0
A^2	0.222 2	1	0.222 2	3.78	0.070 9
C^2	0.222 2	1	0.222 2	3.78	0.070 9
D^2	0.347 2	1	0.347 2	5.91	0.028 1 *
E^2	1.39	1	1.39	23.62	0.000 2 **
残差	0.881 9	15	0.058 8		
失拟	0.481 9	6	0.080 3	1.81	0.203 9
误差	0.400 0	9	0.044 4		
总和	50.74	35			

度、叶片偏角和前进速度,而叶片斜角对试验指标无显著影响。

同样去除对撒肥有效幅宽影响不显著因素,最终获得撒肥有效幅宽与各试验因素的二次回归方程为

$$W = 21.79 - 0.15A - 0.433B - 0.315C + 0.027D - 0.065E - 0.23AB - 0.001D^2 + 0.000\,083E^2$$

(17)

表 4 表明,对撒肥有效幅宽 W 影响极显著因素包括 E 、 AB 和 E^2 ,对 W 影响显著因素为 D^2 ,对撒肥有效幅宽影响显著性最大因素为圆盘转速。

4.3.3 响应曲面分析

图 10 为利用 Design-Expert 8.0.6 软件生成因素交互作用对试验指标 C_v 与 W 影响的响应曲面图。

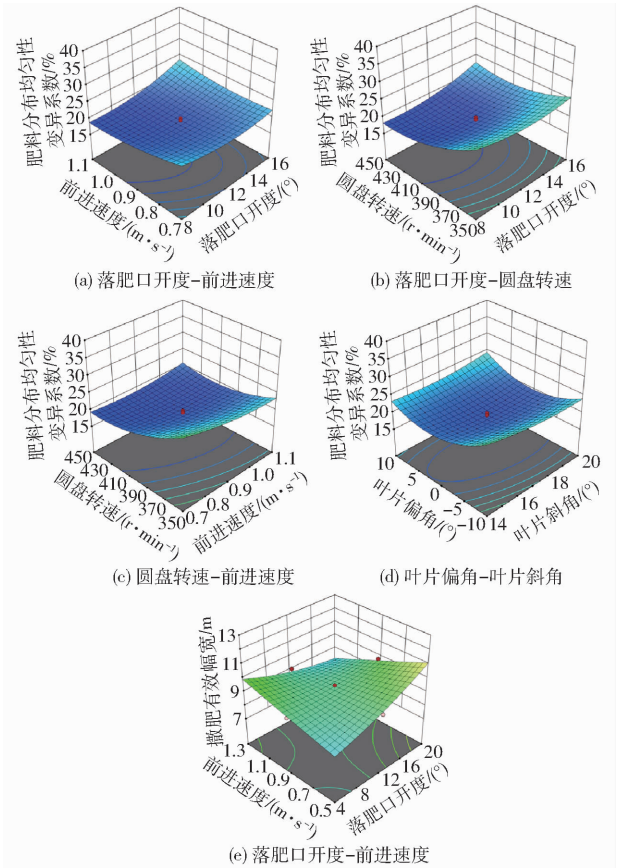


图 10 因素交互作用对 C_v 与 W 的影响响应曲面

Fig. 10 Response surface plots of C_v and W

图 10a 为落肥口开度与前进速度对 C_v 的交互作用。落肥口开度在 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 时, C_v 随前进速度增大而呈现先降后升趋势;开度在 $12^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 时, C_v 与前进速度成正相关,且前进速度为 1.1 m/s 、落肥口开度为 16° 时, C_v 达最大值。前进速度在 $0.7 \sim 0.9\text{ m/s}$ 时, C_v 随落肥口开度增加呈现先降后升趋势;速度在 $0.9 \sim 1.1\text{ m/s}$ 时, C_v 与落肥口开度成正相关。

图 10b 为落肥口开度与圆盘转速对 C_v 的交互作用。落肥口开度在 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 时, C_v 与圆盘转速成负相关;开度在 $12^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 时, C_v 随圆盘转速增大先降后升。圆盘转速在 $350 \sim 410\text{ r/min}$ 时, C_v 随落肥口开度增大先降后升;转速在 $410 \sim 450\text{ r/min}$ 时, C_v 与落肥口开度成正相关。

图 10c 为前进速度与圆盘转速对 C_v 的交互作用。当前进速度不变时, C_v 与圆盘转速呈现负相关;当圆盘转速不变时, C_v 随着前进速度的增大呈现先降低后升高的趋势。

图 10d 为叶片斜角与叶片偏角对 C_v 的交互作用。在叶片斜角不变时, C_v 随着叶片偏角的增大呈现先降低后升高的趋势;在叶片偏角不变时, C_v 随着叶片斜角的增大同样呈现先降低后升高的趋势。

图 10e 为落肥口开度与前进速度对 W 的交互作用。落肥口开度在 $4^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 时, W 随前进速度从 0.5 m/s 增至 1.3 m/s 而升高;开度在 $12^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 时, W 随前进速度增大而降低。前进速度为 $0.5 \sim 0.9\text{ m/s}$ 时, W 随落肥口开度从 4° 增至 20° 而升高;速度 $0.9 \sim 1.3\text{ m/s}$ 时, W 随落肥口开度增大而降低。

4.3.4 参数优化

利用 Design-Expert 的中心组合响应曲面设计对撒肥作业参数组合进行优化。优化原则为使 C_v 取到最小值, W 取到最大值,即在保证作业质量的同时也最大限度地提高作业效率,其参数约束条件为

$$\begin{cases} \min C_v = f(A, B, C, D, E) \\ \max W = f(A, B, C, D, E) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 6^{\circ} \leq A \leq 30^{\circ} \\ 0.5\text{ m/s} \leq B \leq 1.3\text{ m/s} \\ 11^{\circ} \leq C \leq 23^{\circ} \\ -20^{\circ} \leq D \leq 20^{\circ} \\ 300\text{ r/min} \leq E \leq 500\text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

最终得到的最优参数组合为:落肥口开度为 8° 、前进速度为 1.1 m/s 、叶片斜角为 16.22° 、叶片偏角为 0.42° 、圆盘转速为 450 r/min ,此时肥料分布变异系数 C_v 达到最小,为 18.7% ,撒肥有效幅宽 W 达到最大,为 10.96 m ,此时撒肥机作业效果最佳。利用最佳参数组合进行仿真试验,测得 C_v 为 19.2% , W 为 10.5 m ,表明参数优化结果可靠。

5 撒肥台架试验

5.1 台架试验设计

2023 年 10 月,在东北农业大学工程训练中心开展撒肥台架试验,通过在地面排列收集盒方式测量肥料静态扩展模式^[23],如图 11 所示。选用约翰迪尔 704 型拖拉机牵引撒肥机,撒肥圆盘离地 800 mm ,试验区域为 $14\text{ m} \times 8\text{ m}$,地面铺塑料薄膜回收肥料。按 13×9 矩阵摆放收集盒 ($29\text{ cm} \times 19\text{ cm} \times 10\text{ cm}$) 共 117 个,收集盒内壁粘贴柔软棉布减少肥料弹跳从而降低误差。撒肥机覆盖该区域后,称量

各收集盒内肥料质量,表示肥料横向质量分布,并检测肥料颗粒沉积效果^[24-28]。



图 11 撒肥台架试验
Fig. 11 Fertilizer spreading bench test

5.2 试验结果与分析

前 1~3 组试验为撒肥机在最佳参数组合下,测得 C_v 平均值为 24.75%, W 平均值为 8.7 m,第 4 组试验为配备初始单通道直线式撒肥叶片,测得 C_v 为 38.32%, W 为 7.0 m。台架与仿真试验的 C_v 平均误差为 0.24%, W 平均误差为 0.26 m,误差在可接受范围,说明撒肥仿真试验可靠性强;第 4 组试验为双通道斜置式撒肥叶片与初始叶片撒肥效果对比, C_v 降低 35.42%, W 提高 23.86%,表明该叶片用于撒肥机可有效提升作业质量。

6 撒肥田间试验

6.1 田间试验设计

为验证双变量撒肥控制系统控制精度与整机田间作业性能,参照 GB/T 5262—2008《农业机械 试验条件》,对变量撒肥机开展田间试验。试验于 2024 年 7 月在黑龙江省阿城区水稻试验田(追施分蘖肥)进行,如图 12 所示。



图 12 撒肥田间试验
Fig. 12 Spreading fertilizer field test

参考水稻追施分蘖肥 75~112.5 kg/hm²,设定每平方米追施 15 g 肥料。试验前在肥箱装固定质量肥料,试验中撒肥机以不同速度作业,作业区长 10 m,试验后称量肥箱剩余肥料,通过差值算出实际施肥量。肥料分布均匀性变异系数 C_v 通过称取撒肥机后方收集盒内的肥料质量测得,以肥料施用控制精度 P 、总排肥量稳定性系数 S 、单位面积施肥量误差 R 为试验指标。试验因素水平与结果见表 5,其中 1~6 组为配备双变量撒肥控制系统后进行作业,7~9 组为 1~3 组的对比试验,撒肥作业过程中不运行双变量撒肥控制系统,按照施肥比例关系式

表 5 撒肥田间试验结果

Tab. 5 Results of fertilizer spreading field trials							
组号	$A/$ ($^{\circ}$)	$B/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$E/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	$C_v/$ %	$P/$ %	$S/$ %	$R/$ %
1	5.4	0.5	424	25.4	91.3		23.2
2	6.2	0.6	442	23.7	87.6		18.3
3	6.8	0.7	454	24.3	92.6		15.7
4	7.5	0.8	472	21.2	90.4		24.6
5	7.5	0.8	472	23.9	91.7	94.6	20.8
6	7.5	0.8	472	25.3	90.6		16.2
7	6.0	0.5	518	32.8			
8	6.0	0.6	413	28.4			
9	6.0	0.7	345	35.7			

直接给定落肥口开度 A 与撒肥圆盘转速 E 进行作业。

6.2 试验结果与分析

由 1~6 组试验结果可知,控制系统肥料施用控制精度均值达 90.7%,单位面积施肥量误差均值达 19.8%,表明该系统精准施肥能力强、性能可靠,可依作物需求和土壤肥力,智能精准调控施肥量;由 1~3 组与 7~9 组试验结果可知,配备控制系统优化作业参数组合作业后的 C_v 达 24.5%,而不配备控制系统撒肥作业后 C_v 达 32.3%,表明系统优化参数组合在保证精准按需施肥的同时,也达到了最佳的肥料分布均匀度,显著提高撒肥装置作业质量;由 4~6 组试验结果可知,撒肥机总排肥量稳定性系数均值达 94.6%,说明装置工作性能稳定,实际作业时能按预设单位面积施肥量精准施肥,满足水稻追肥作业要求。

7 结论

- (1)本研究设计了单圆盘离心式变量撒肥机与双通道斜置式撒肥叶片结构,构建撒肥仿真模型,进行正交试验。分别得出肥料分布均匀性变异系数 C_v 与撒肥有效幅宽 W 的回归方程,并优化出作业效果最佳时的参数组合,即当落肥口开度为 8°,叶片偏角为 0.42°,叶片斜角为 16.22°,圆盘转速为 450 r/min,前进速度为 1.1 m/s 时, C_v 达到最低,为 18.7%, W 达到最大,为 10.96 m。
- (2)开展撒肥台架试验,结果表明构建仿真模型的可靠性强,该叶片相比于初始叶片撒肥作业时的 C_v 降低了 35.42%, W 提高了 23.86%,有效提高了撒肥装置作业质量。
- (3)开展撒肥田间试验,结果表明双变量撒肥控制系统的肥料施用控制精度达 90.7%,撒肥装置的肥料分布均匀性变异系数可达 24.5%,总排肥量稳定性系数可达 94.6%,单位面积施肥量误差可达 19.8%,说明整机工作性能较优,满足水稻追肥作业要求。

参 考 文 献

- [1] 李杰,杨洪建,邓建平. 江苏水稻生产现状和新形势下绿色可持续发展的技术对策[J]. 中国稻米,2017,23(2):41–44.
LI Jie,YANG Hongjian,DENG Jianping. Current situation of rice production in Jiangsu Province and technical countermeasures for the green and sustainable development under the new circumstances[J]. Chinese Rice,2017,23(2):41–44. (in Chinese)
- [2] 郭九信,孔亚丽,谢凯柳,等. 养分管理对直播稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 作物学报,2016,42(7):1016–1025.
GUO Jiuxin,KONG Yali,XIE Kailiu,et al. Effects of nutrient management on yield and nitrogen use efficiency of direct seeding rice[J]. Acta Agronomica Sinica,2016,42(7):1016–1025. (in Chinese)
- [3] 丁友强,祁兵,王云霞,等. 基于时空耦合补偿的处方图式稻麦变量施肥系统研究[J]. 农业机械学报,2025,56(12):279–288.
DING Youqiang,QI Bing,WANG Yunxia,et al. Research of prescription map-based variable rate fertilization system for rice and wheat with spatio-temporal coupling compensation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(12):279–288. (in Chinese)
- [4] PRZYWARA A, SANTORO F, KRASZKIEWICZ A, et al. Experimental study of disc fertilizer spreader performance[J]. Agriculture,2020,10(10):467.
- [5] SEOK-JOON H, JU-SEOK N. DEM simulation model to optimise shutter hole position of a centrifugal fertiliser distributor for precise application[J]. Biosystems Engineering,2021,204:326–345.
- [6] AHMED A, KHALID A, ELKAMIL T. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2019,160:31–39.
- [7] 张国忠,王洋,刘浩蓬,等. 离心侧抛式藕田撒肥器设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(19):37–47.
ZHANG Guozhong,WANG Yang,LIU Haopeng,et al. Design and experiments of the centrifugal side throwing fertilizer spreader for lotus root fields[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(19):37–47. (in Chinese)
- [8] FAN C S, HE R Y, SHI Y Y, et al. Structure and operation of centrifugal side-throwing organic fertilizer spreader for greenhouses[J]. Powder Technology,2024,438:119457.
- [9] 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.
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. (in Chinese)
- [10] GAO Y Y, FENG K Y, YANG S, et al. Design and experiment of an unmanned variable-rate fertilization control system with self-calibration of fertilizer discharging shaft speed[J]. Agronomy,2024,14:2336.
- [11] 张书慧,齐江涛,廖宗建,等. 基于 CPLD 的变量施肥控制系统开发与应用[J]. 农业工程学报,2010,26(8):200–204.
ZHANG Shuhui,QI Jiangtao,LIAO Zongjian,et al. Research and application of control system for variable rate fertilizer applicator based on CPLD[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(8):200–204. (in Chinese)
- [12] 丁幼春,李浩鹏,董万静,等. 基于处方图的油菜精准变量施肥调控系统设计 with 试验[J]. 农业机械学报,2025,56(3):256–266.
DING Youchun,LI Haopeng,DONG Wanjiang,et al. Design and experiment of precise variable fertilization control system for oilseed rape based on prescription maps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(3):256–266. (in Chinese)
- [13] 王金峰,吕振阳,赵敏义,等. 基于处方图的水稻侧深变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):151–162.
WANG Jinfeng,LÜ Zhenyang,ZHAO Minyi,et al. Design and experiment of rice side-deep variable rate fertilization control system based on prescription diagrams[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,55(9):151–162. (in Chinese)
- [14] COOL S, PIETES J, METENS K C, et al. A simulation of the influence of spinning on the ballistic flight of spherical fertiliser grains[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2014,105:121–131.
- [15] VILLETTE S, COINTAULT F, PIRON E. Centrifugal spreading: an analytical model for the motion of fertiliser particles on a spinning disc[J]. Biosystems Engineering,2005,92(2):157–164.
- [16] GRIFT T, KWEON G, HOFSTEE J, et al. Dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles[J]. Biosystems Engineering,2006,95(4):507–515.
- [17] 张睿,王秀,赵春江,等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(6):20–25.
ZHANG Rui,WANG Xiu,ZHAO Chunjiang,et al. Design and experiment of variable rate fertilizer spreader with conveyor chain[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(6):20–25. (in Chinese)
- [18] ISO5690–2–1984. Equipment for distributing fertilizers-testing methods – Parts 2:fertilizer distributors in lines[S]. 1984.

[19] ASAE S341.2. Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders[S]. 1999.

[20] 胡永光,杨叶成,肖宏儒,等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. 农业机械学报,2016,47(5):77-82.
HU Yongguang,YANG Yecheng,XIAO Hongru,et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(5):77-82. (in Chinese)

[21] 刘彩玲,黎艳妮,宋建农,等. 基于 EDEM 的离心甩盘撒肥器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(14):32-39.
LIU Cailing,LI Yanni,SONG Jiannong,et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(14):32-39. (in Chinese)

[22] 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)

[23] COETZEE C, LOMBARD S. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader [J]. Biosystems Engineering,2011,109(4):308-325.

[24] 陆雨,徐南清,段建设. 机械侧深施肥下水稻产量和肥料利用效率研究[J]. 湖北农业科学,2022,61(14):19-23.
LU Yu,XU Nanqing,DUAN Jianshe. Study on rice yield and fertilizer utilization efficiency under side deep fertilization[J]. Hubei Agricultural Sciences,2022,61(14):19-23. (in Chinese)

[25] 杨青林,桑利明,孙吉茹,等. 我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]. 山西农业科学,2011,39(7):690-692.
YANG Qinglin,SANG Liming,SUN Jiru,et al. The current situation of fertilizer utilization in China and the methods to improve the utilization rate of chemical fertilizers[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2011,39(7):690-692. (in Chinese)

[26] 伍杂日曲,郭长春,李飞杰,等. 减氮和机械侧深施肥对机插杂交稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 核农学报,2022,36(5):1034-1041.
WU Zariqu,GUO Changchun,LI Feijie,et al. Effects of nitrogen reduction and mechanical side-deep fertilization on yield and nitrogen uptake and utilization of mechanically transplanted hybrid rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2022,36(5):1034-1041. (in Chinese)

[27] 刘莫尘,赵庆吉,韩守强,等. 桑园自走式变比配肥定向撒肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊2):120-130.
LIU Mochen,ZHAO Qingji,HAN Shouqiang,et al. Development and test of self-walking mulberry garden integrated machine with variable proportion and directional disperse fertilization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 2):120-130. (in Chinese)

[28] 王海毕,李军政,刘从,等. 基于离散元法的复合肥参数标定[J]. 农机化研究,2024,46(11):191-196.
WANG Haibi,LI Junzheng,LIU Cong,et al. Parameter calibration of compound fertilizer based on the discrete element method [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(11):191-196. (in Chinese)