doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.008

油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验

廖宜涛[1,2]　高丽萍[1]　廖庆喜[1,2]　张青松[1,2]　刘立超[1]　付云开[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: 针对长江中下游稻油轮作区油菜直播时,土壤黏重板结且前茬水稻收获后秸秆残茬量大,机具易壅土、挂草堵塞,难以实现深施肥的难题,设计了一种油菜精量联合直播机主动防堵深施肥装置。基于主动刮削防堵原理,分析确定施肥铲入土部位曲线为与旋耕刀轴回转中心同心、包络旋耕刀末端运动轨迹的圆弧;根据深施肥铲防堵功能及铲体内肥料颗粒运动分析,确定过渡段下圆弧直径、入土段圆弧圆心角、过渡段上圆弧直径等施肥铲结构设计关键参数及其许用范围;以施肥铲末端肥料流出瞬时速度最大为优化目标,以施肥铲关键结构参数为设计变量、其许用范围为约束条件,构建施肥铲结构优化设计的数学模型;通过施肥过程离散元仿真分析,以施肥铲体入土段上端圆弧圆心角、过渡段圆弧直径为试验因素,以施肥铲末端肥料流出瞬时速度为响应指标,进行二次回归正交旋转组合试验,建立该数学模型的目标函数,求解得到施肥铲结构优化设计最佳参数为:入土段上端圆弧圆心角为 36°、过渡段上端圆弧直径为 93 mm、过渡段下端圆弧直径为 66 mm。田间试验结果表明,安装深施肥装置的直播机作业后厢面平整度为 17.96 ~ 21.37 mm,单个施肥铲黏附质量保持在 1.5 kg 以下,施肥深度平均值为 91.10 mm,施肥深度合格率为 93.33%,施肥断条率为 1.08%,机具通过性良好,可满足稻油轮作区油菜种植施肥播种农艺要求。

关键词: 油菜精量联合直播机; 深施肥; 主动防堵; 优化设计; 离散元法
中图分类号: S223.2+4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)02-0065-11　　**OSID**:

Design and Test of Side Deep Fertilizing Device of Combined Precision Rapeseed Seeder

LIAO Yitao[1,2]　GAO Liping[1]　LIAO Qingxi[1,2]　ZHANG Qingsong[1,2]　LIU Lichao[1]　FU Yunkai[1]
(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: Existing rapeseed cultivation in the mid-lower Yangtze River area in China, which is planted after the rice-growing season with sticky soil and a large number of straw, has a persistent challenge that the traditional deep fertilization device of rapeseed combined seeder obsessed with straw entanglement and soil adhesion, highlighting a need for deep fertilization technology and equipment. The purpose was to design an active anti-blockage and deep fertilization device for rapeseed combined seeder. Based on the principle of active scraping and preventing plugging, the center of movement curve of the fertilizer shovel contacting soil was determined as the center of the rotary cultivator axis and the shape of the movement curve was set as enveloping the trajectory of the end of rotary cultivator. According to the requirements of anti-blocking function of deep fertilization device and the requirements of fertilizer particle movement, the key parameters and allowable range of the design of fertilizer shovel structure were determined, such as the diameter of arc at the lower end of transition section d_1, the angle of arc at the center of entry section θ_2 and the diameter of arc at the upper end of transition section d_2. Taking the maximum instantaneous velocity of fertilizer outflow from the end of fertilizer shovel as the optimization objective, the key structural parameters of fertilizer shovel as design variables and its allowable scope as constraints, a mathematical model for optimum design of fertilizer shovel structure was established. Through the simulation analysis of the fertilization process by the discrete element method, the factors of the center angle of circular arc section of fertilizer shovel entering soil θ_2, the diameter of the transition section d_1,

收稿日期: 2019-10-25　修回日期: 2019-11-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200901)、国家油菜产业体系专项(CARS-12)和湖北省自然科学基金项目(2019CFB153)
作者简介: 廖宜涛(1982—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

d_2 were taken as test factors. With v_z as the response index, a quadratic regression orthogonal rotational combination test was carried out to establish the objective function of the mathematical model. The optimum design parameters of the fertilizer shovel structure were obtained as follows: the arc center angle of the entry section θ_2 was 36°, the arc diameter of the upper end of the transition section d_2 was 93 mm, and the arc diameter of the lower end of the transition section d_1 was 66 mm. The field test results showed that the flatness of rear chamber of direct seeder with deep fertilizer applicator was 17.96 ~ 21.37 mm, the adhesion weight of single fertilizer shovel was stable below 1.5 kg, the mean of fertilization depth was 91.10 mm, the qualified rate of fertilization depth was 93.33%, the rate of fertilization broken strip was 1.08%, and the machine passed well, which met the agronomic requirements of rape planting and fertilization in the rice-rape rotation area.

Key words: combined precision rapeseed seeder; deep fertilization; active anti-blockage; optimum design; discrete element method

0 引言

油菜是我国长江中下游地区主要冬季油料作物,且具有饲、肥、菜、蜜及旅游观花等多种功能用途,其种植模式以水旱交替的稻油轮作为主[1-2]。油菜精量联合直播可一次性完成所有油菜种植工序,是油菜轻简化栽培的重要技术,在促进油菜生长和粮油高产中发挥了重要作用[3-5]。

施肥是油菜种植的重要环节,目前我国直播油菜基肥主要以撒施、浅层混施为主,存在肥料分布不均匀、作物根系吸肥量不一致等问题。研究表明,同等氮肥用量和运筹下,直播油菜通过深施基肥将化肥条施在地表下作物根系密集层,可保证被作物充分吸收,增加干物质积累,提高油菜产量,减少肥料有效成分的挥发和流失,提高肥料利用率[6-7]。直播油菜基肥深度一般控制在 80 ~ 100 mm,以促进苗期根系生长,满足后期养分需求,同时避免残留过多[8-9]。深施缓控释肥,使肥料养分释放规律与作物生长周期养分吸收需求同步,延长养分供应时间,可提高肥料利用率,减少后期追肥次数,实现油菜轻简化栽培[10-11]。

化肥深施的关键部件是深施肥装置,其主要功能是先分隔表层土壤、秸秆等物料,开出肥沟,将肥料导入指定深度的土层,再由回流土壤进行覆盖。VAMERALI 等[12]研制了一种带有宽扫刀的凿式施肥装置,前端凿型铲开出肥沟,后端宽扫刀通过其上侧犁刀切断秸秆,并通过犁刀后端使土壤和玉米秸秆残茬充分混合后回填肥沟。JOHAN 和 AILI 等[13-14]研制一种类弹齿式施肥开沟器,通过土槽试验研究了不同类型铲尖对土壤的扰动、土层碎裂状态及工作阻力的影响。杨然兵等[15]研制了一种马铃薯种植组合式分层施肥开沟器,开沟器前铲入土开沟并对土壤进行切削破碎,V 型防堵结构防止回土堵塞出肥口,分土板对肥料进行回土覆盖。祝清震等[16-17]设计了冬小麦基肥分层定深施用装置,实现了分层施肥作业并对出肥口位置与施肥深度关系进行了研究。曾山等[18]研制的同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机采用锐角式施肥开沟器开出肥沟,通过拖板刮土覆盖肥沟实现机械定位深施肥。陈雄飞等[19]研制的水田两级排肥装置,采用滑切式水田深施肥开沟器开出肥沟,通过仿形导肥管内的螺旋输送器将肥料施入肥沟内,避免出肥口堵塞。

以上深施肥装置主要适用于旱地或水田作业。长江中下游稻油轮作区前茬作物为水稻,油菜直播农时紧张,土壤因水稻生产季长期浸泡而导致黏重板结,且水稻收获后秸秆残茬量大,现有深施肥装置作业时易出现工作部件黏附土壤、缠绕秸秆,进而导致机具壅土堵塞,影响了机具通过性,难以实现油菜直播深施肥作业。本文基于已在生产中推广应用的 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机[20-21],设计配套的主动式防堵深施肥装置,通过工作原理分析和结构优化设计,确定施肥铲主要结构参数,实现与旋耕刀配合作业、主动刮削,防止施肥铲体挂草堵塞,完成深施肥作业,以满足稻油轮作区油菜种植施肥播种的农艺要求。

1 整机结构与工作原理

装配深施肥装置的 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机如图 1 所示,主要由主机架、仿形驱动地轮、排肥系统、排种系统、开畦沟犁、旋耕部件、包络式施肥铲、平土板、双圆盘开沟器等组成,其中包络式施肥铲固定在主机架后梁上,铲体包络旋耕刀片的运动轨迹,利用旋耕刀刮削实现铲体表面防黏附。直播机工作时由拖拉机牵引前进,两侧的前后组合式开畦沟犁开沟;旋耕部件在拖拉机动力输出轴驱动下正旋切削土壤,同时对铲体上的黏附物进行主动刮削、抛撒,避免土壤秸秆在施肥铲面上黏附堆积造成壅土堵塞;施肥铲阻隔碎土,通过包络式腔体引导肥料均匀投放至肥沟,随后通过碎土回流和平土板作用,实现深施肥料覆盖并平整厢面。开

沟旋耕深施肥及平土板等工作部件相互配合，形成适宜油菜播种的种床，排种器排出的种子落入双圆盘开沟器在种床上开出的种沟中，完成联合直播作业。

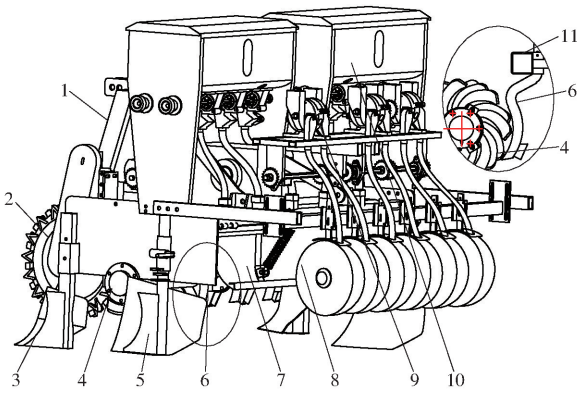


图 1　油菜精量联合直播机结构简图

Fig. 1　Structural diagram of combined rapeseed seeder

1. 主机架　2. 仿形驱动地轮　3. 开畦沟前犁　4. 旋耕部件
5. 开畦沟后犁　6. 包络式施肥铲　7. 平土板　8. 双圆盘开沟器
9. 排种系统　10. 排肥系统　11. 机架后梁

2　深施肥开沟铲体设计与结构参数分析

2.1　施肥铲体结构及参数

包络式施肥铲结构曲线如图 2 所示，其由入土段 *ABC*、过渡段 *CD*、铲柄段 *DE* 组成，*D* 点为机架后梁最低点；工作时，土壤与施肥铲主要接触、发生黏土挂草部位为 *ABC* 段，其中 *AB* 为入土段，*BC* 为抛土接触段；为实现旋耕刀主动刮削黏附在施肥铲体上的土壤秸秆混合物，*ABC* 段设计为与旋耕刀轴回转中心同心、包络旋耕刀末端运动轨迹的圆弧。*AB* 段根据油菜种植施肥深度要求确定；*BC* 段圆弧的圆心角越大，施肥铲的包络效果越好，黏附缠绕土壤秸秆量越少，但圆心角太大则易导致 *BC* 段平缓，影响肥料从铲体内正常流出。

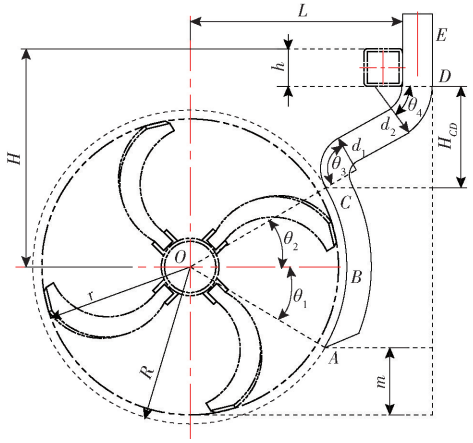


图 2　包络式施肥铲体曲线

Fig. 2　Curve of envelope fertilizer shovel

施肥铲体各参数间结构关系为

$$\begin{cases} H=\sin\theta_2(R+d_1)+d_1\cos\theta_3+d_2\sin\theta_4+[L-R\cos\theta_2-\\ \qquad d_1(\cos\theta_2-\cos\theta_4)-d_2(1-\sin\theta_4)]\dfrac{1}{\tan\theta_4}\\ L=\tan\theta_4(H_{CD}-d_1\sin\theta_2-\varphi_1\cos\theta_3+d_2\sin\theta_4)+\\ \qquad [R\cos\theta_2+d_1(\cos\theta_2-\cos\theta_4)+d_2(1-\sin\theta_4)]\\ H_{CD}=d_1(\sin\theta_2+\cos\theta_3)+d_2\sin\theta_4+\dfrac{L}{\tan\theta_4}-\\ \qquad [R\cos\theta_2+d_1(\cos\theta_2-\cos\theta_4)+d_2(1-\sin\theta_4)]\\ \cos\theta_2>\cos\theta_4 \end{cases} \tag{1}$$

式中　H——旋耕刀辊回转中心至旋耕后梁高度，mm

L——旋耕刀辊回转中心至旋耕后梁水平距离，mm

R——施肥铲入土段圆弧半径，mm

H_{CD}——施肥铲过渡段垂直高度，mm

θ_2——施肥铲入土段上端圆弧对应圆心角，(°)

θ_3——施肥铲过渡段下端圆弧对应圆心角，(°)

d_1——施肥铲过渡段下端圆弧直径，mm

θ_4——施肥铲过渡段上端圆弧对应圆心角，(°)

d_2——施肥铲过渡段上端圆弧直径，mm

由式(1)可知，在参数 H、L 确定的条件下，入土段上端圆弧圆心角 θ_2 增大，过渡段垂直距离 H_{CD} 减小，且过渡段与水平面夹角减小，影响肥料颗粒在铲内的流动性；过渡段上端圆弧直径 d_2 增大，其圆心角 θ_4 随之增大，而过渡段下端圆弧直径 d_1 及其圆心角 θ_3 随之减小，易导致肥料颗粒堆积在过渡段下端，不能顺利流出。因此 θ_2、d_1、d_2 是影响施肥铲包络刮削防堵效果和肥料顺畅流出的重要结构参数。

2.2　入土段结构参数分析

2.2.1　圆弧半径

根据油菜播种施肥农艺要求，设计施肥铲拟施肥深度为 80 ~ 100 mm。为使施肥铲入土圆弧段曲面能与旋耕刀相互配合，使旋耕刀片主动刮削黏附在施肥铲体上的土壤秸秆混合物，实现主动防堵，确定施肥开沟器入土段圆弧圆心与旋耕刀轴回转中心重合，包络半径比旋耕刀轴回转半径增大 $\Delta\delta$。考虑施肥铲与旋耕刀片之间配合作用时刀片末端与工作曲面之间的间隙尽可能小，并避免发生干涉，根据 GB/T 5669—2008《旋耕机械 刀和刀座》规定刀柄固定孔中心距偏差极限值为 2.0 mm，并根据前期试验确定 $\Delta\delta=5$ mm，即施肥铲入土圆弧段包络半径为 $R=r+\Delta\delta$，r 为旋耕刀回转半径。

2.2.2　下圆弧圆心角

施肥铲入土部位主要工作曲面为入土段曲面，圆心角 θ_1、θ_2 共同确定入土段曲面长度，且圆心角 θ_1 用于确定施肥深度。

施肥铲入土段包络旋耕弯刀运动轨迹,以旋耕刀轴回转中心为圆心、以平行于水平面的回转半径为界,将入土段圆弧所对应圆心角分为 θ_1、θ_2。根据拟定施肥深度与旋耕深度的差值,确定施肥铲 A 点与旋耕刀回转半径最低点距离 m,即可确定圆心角 θ_1 的数值,根据空间力系关系得

$$f(\theta_1) = \arcsin\frac{r-m}{r+\Delta\delta} \tag{2}$$

根据油菜播种施肥农艺要求,确定施肥深度为 80 ~ 100 mm,取目标深度为 100 mm,标准旋耕刀 IT245 回转半径 r = 245 mm,则 m = 145 mm,选定 $\Delta\delta$ = 5 mm,将数值代入式(2)得 θ_1 的取值为 23.58°。

2.2.3 上圆弧圆心角

入土段上端圆弧圆心角 θ_2 的取值影响肥料在铲体内的流动性及施肥铲作业时的防堵性能。前期研究中为保证肥料流出,设计的施肥铲入土段上端圆弧圆心角 θ_2 较小,试验时发现被切削抛至旋耕机后方的土壤易黏附在铲体上且不断黏带秸秆,旋耕刀片顺铣自下往上刮削黏附在铲体上的土壤秸秆混合物时,出现部分黏附物在过渡段 CD 处堆积,进而造成机具壅土堵塞;而施肥铲结构参数分析表明,随着 θ_2 增大,施肥铲过渡段 CD 处直线段与水平面夹角越小,肥料颗粒不能顺利流下,影响施肥均匀性。因此设计的深施肥铲 θ_2 应大于旋耕抛土角,并保证肥料顺利从铲体内流出。

旋耕刀的运动轨迹为余摆线,旋耕部件在工作过程中,旋耕刀端点的绝对运动是整机前进速度 v_m 和旋耕刀角速度 ω 随刀辊与拖拉机轮同向转动的合成运动[22]。土壤被旋切至斜后方运动受多因素影响,假定土块在被切开后脱离弯刀时,土块脱离旋耕刀刃端点瞬间的绝对速度等于旋耕刀刃端点的绝对速度,土块的运动与相邻土块运动无关,土壤微粒和刀片撞击后,沿与刀片法向偏斜的反射角 β' 的方向运动,根据文献[22]该角和切削角 β 的关系为

$$\frac{\tan\beta'}{\tan(90-\beta)} = \frac{1-f}{k_y} \tag{3}$$

即

$$\beta' = \arctan\frac{1-f}{k_y\tan\beta} \tag{4}$$

式中 f——土壤与刀片的摩擦因数

k_y——土壤微粒还原系数

为使土垡均匀抛撒且不影响旋耕机具作业质量,根据文献[23],取土壤微粒还原系数 k_y = 0.4,土壤和刀片的摩擦因数 f = 0.5,刀片切削角 β = 60°,代入式(4)可得 β' = 35.8°。

在不考虑土块之间的碰撞及空气阻力的情况下,被旋耕刀后抛的土块可以看作一个质点,理论上它将做斜上抛运动,如图 3 所示。设旋耕刀端点转到 B 点时,土块刚好脱离旋耕刀的约束,将此时土块的绝对速度分别投影到 x 轴和 y 轴上。x 轴为旋耕刀刃端点切线方向,y 轴为旋耕刀刃法线方向。

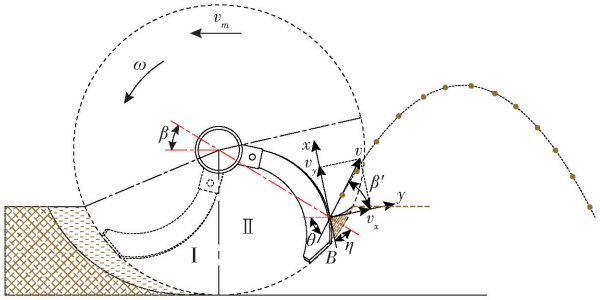


图 3 土块运动轨迹

Fig. 3 Motion trajectory of soil block

刀刃的静态滑切角 η,即螺旋线上某一点的极径与该点切线之间的夹角[24]。由空间力系关系可得

$$\theta = \beta' + (90-\eta) - \beta \tag{5}$$

式中 θ——土块抛扔角,(°)

根据文献[25]可得,IT245 旋耕刀侧切刃上任意点的静态滑切角 η = 34.4°。代入式(5)得 θ = 31.4°,根据实际作业需求,设定圆心角 θ_2 最小值为 32°。

由前期试验可知,当圆心角 θ_2 超过 42°时,肥料颗粒易堆积在铲体过渡段 CD 位置,使肥料颗粒不能顺利落入肥沟内,影响施肥均匀性;且由前期研究所得[22-23],当旋耕土块抛土角超过 45°时影响旋耕机构的土壤抛撒特性,为避免土块不能顺利抛出堆积在旋耕机处,影响机具的作业性能、通过性及厢面平整度,综合考虑取圆心角 θ_2 最大值为 46°。

2.3 过渡段圆弧直径参数分析

在已知定位参数旋耕刀辊回转中心至旋耕后梁高度 H、水平距离 L 及入土段上端圆弧圆心角 θ_2 取值范围,以及施肥铲安装不发生干涉的条件下,若过渡段圆弧直径 d_1、d_2 为定值,当圆心角 θ_2 适当增大,旋耕刀片刮削黏附在铲体上的土壤时,土壤不易堆积在铲柄处,有利于实现主动防堵,但过渡段趋于平缓,影响肥料颗粒的流动性;若圆心角 θ_2 一定,随过渡段圆弧直径 d_1、d_2 的增大,过渡段直线段将不断缩短且趋于与水平面平行,同样影响肥料颗粒在铲内的流动性。铲体的截面为 47 mm × 35 mm,在考虑施肥铲体截面尺寸条件下最小折弯半径,选取过渡段 CD 圆弧直径 d_1、d_2 的下限值分别为 50 mm 和 80 mm。为保证肥料颗粒在进入施肥铲内后不发生堆积、堵塞现象,顺利落入肥沟完成施肥作业,由前

期测定肥料颗粒(湖北宜施壮农业科技有限公司，油菜专用缓释肥)的最小静摩擦角为 18°，当圆心角 θ_2取 46°、过渡段 *CD* 圆弧上端直径 d_2取 80 mm 时，过渡段 *CD* 圆弧下端直径 d_1取 120 mm 时过渡段 *CD* 处直线段与水平面的夹角为 17.84°，则过渡段圆弧上端直径 d_2的取值范围为 80～120 mm，下端圆弧直径 d_1取值范围为 50～130 mm。

3　施肥结构仿真优化

3.1　优化设计数学模型

由施肥铲结构设计分析可知，过渡段 *CD* 两处圆弧直径 d_1、d_2和入土段 *ABC* 上端圆弧圆心角 θ_2是影响施肥铲防堵性能及肥料颗粒流动性的重要参数，施肥铲的结构设计应该在满足刮削防堵条件下保证肥料颗粒在铲内的运动流畅。以施肥铲末端肥料颗粒垂直于水平方向的流出速度 v_z最大为优化目标，令设计变量 $\boldsymbol{X}=(\theta_2,d_2,d_1)=(x_1,x_2,x_3)$，建立施肥铲优化设计数学模型

$$\begin{cases}\max\ v_z=f(\boldsymbol{X})\\ \text{s.t.}\begin{cases}32°\leqslant x_1\leqslant 46°\\ 80\ \text{mm}\leqslant x_2\leqslant 120\ \text{mm}\\ 50\ \text{mm}\leqslant x_3\leqslant 130\ \text{mm}\end{cases}\end{cases}\tag{6}$$

肥料颗粒由施肥管连接口进入施肥铲体，由出肥口流出，颗粒动能受肥料间碰撞、肥料颗粒与铲内壁摩擦及碰撞等影响，通过理论分析难以建立目标函数，因此采用离散元仿真分析方法模拟肥料颗粒在施肥铲内的流动过程，以施肥铲体入土段上端圆弧圆心角 θ_2、过渡段圆弧直径 d_1和 d_2为试验因素 x_1、x_2和 x_3，以 v_z为响应指标，开展二次回归正交旋转组合试验，分析各设计关键参数改变时对肥料颗粒流动速度的影响，建立 v_z与各设计关键参数之间的回归方程，用于施肥铲结构优化设计。

3.2　肥料流动过程离散元仿真模型

3.2.1　仿真模型

为保证仿真分析的准确性，按照 1∶1 的比例，采用 Creo 4.0 建立试验用包络式施肥铲的三维结构模型。其中，肥料属于类球型颗粒，其球形度在 88% 以上，因此仿真模型可用球体代替肥料颗粒[26-27]，设置其密度为 1 357 kg/m^3，等效直径 3.7 mm，泊松比 0.25，剪切模量 3.48×10^7 Pa，采用正态分布方式生成仿真颗粒 6×10^4粒，生成速度为 3×10^4颗/s，将参数 Mean 设置为 1，即正态分布的肥料颗粒平均直径为肥料颗粒模型直径，标准差设置为 0.05 mm。颗粒生成模块定义为 Virtual(虚拟体)，可保证生成的肥料颗粒只在重力作用下沿管壁下落，仿真总时长 6 s。根据排肥系统作业原理，依据实际作业情况为外槽轮式排肥器，添加线性旋转运动(Linear rotation)，设置转速为 30 r/min。

由于肥料颗粒的碰撞不是瞬时的，而是多个颗粒同时碰撞，因此选择 Hertz－Mindlin(no－slip)无滑动接触力学模型作为肥料颗粒与颗粒、颗粒与几何体的接触模型，根据文献[27]以及试验修正，肥料颗粒–肥料颗粒、外槽轮–肥料颗粒、铲体内壁–肥料颗粒接触仿真参数如表 1 所示。

表 1　物性及接触参数

Tab.1　Parameter of materials and contact

项目	参数	数值
肥料颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	3.48×10^7
	密度/(kg·m^{-3})	1 357
施肥铲(Q235)	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
	密度/(kg·m^{-3})	7 865
外槽轮(ABS)	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.9×10^8
	密度/(kg·m^{-3})	1 060
肥料颗粒–肥料颗粒	恢复系数	0.35
	静摩擦因数	0.52
	动摩擦因数	0.105
肥料颗粒–外槽轮	恢复系数	0.39
	静摩擦因数	0.51
	动摩擦因数	0.21
肥料颗粒–施肥铲	恢复系数	0.32
	静摩擦因数	0.57
	动摩擦因数	0.28

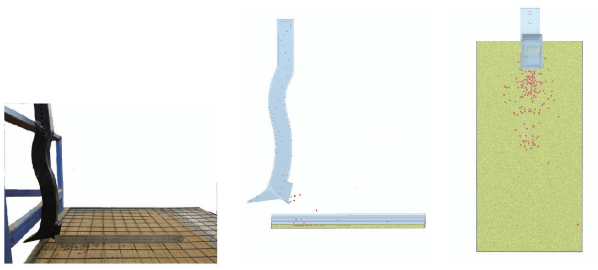
3.2.2　仿真模型参数的验证

为验证仿真模型参数，设计肥料颗粒流动的台架和仿真对比试验。将前期设计的施肥铲固定试验台架上，使其出肥口离地面高度为 100 mm，随机取 240 粒肥料颗粒从施肥铲顶端释放，测量从出肥口流出的肥料颗粒落地距离，以相同条件开展模拟仿真，试验各重复 3 次，试验结果如图 4 所示。台架试验和仿真试验测得的肥料颗粒落地距离的概率分布曲线基本一致；台架试验肥料颗粒落地距离平均值为 89.52 mm，其标准差为 48.70 mm；仿真试验落地距离平均值为 81.93 mm，其标准差为 47.90 mm；二者相差 7.59 mm，相对误差为 8.48%，仿真结果接近台架试验，表明试验测定的 EDEM 仿真参数有效。

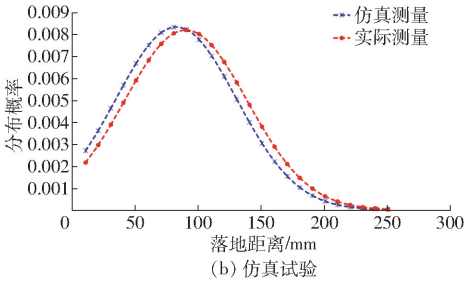
3.3　旋转回归正交仿真试验

3.3.1　试验设计

采用三因素五水平二次正交旋转中心组合优化设计，以 θ_2、d_1、d_2作为试验因素，以肥料颗粒垂直于网格箱体的瞬时速度的平均值 v_z作为响应指标。为获取 v_z，在 EDEM 后处理 Selection 模块中在出肥口



(a) 台架试验



(b) 仿真试验

图 4 肥料颗粒流动台架试验与仿真试验

Fig. 4 Bench test and simulation test of fertilizer particle flow

处创建一个平行于水平面的四方体 Grid Bin Group 网格箱体并设置其高度为 5 mm,提取每粒肥料颗粒通过施肥铲末端的瞬时速度并统计。根据施肥铲结构分析,确定入土段上端圆弧圆心角 θ_2 范围为 32°~46°、过渡段上圆弧直径 d_2 范围为 80~120 mm、过渡段下圆弧直径 d_1 范围为 50~130 mm,因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码

Tab. 2 Coding of factors

编码	因素		
	入土段上端圆弧圆心角 x_1/(°)	过渡段上端圆弧直径 x_2/mm	过渡段下端圆弧直径 x_3/mm
-1.682	32.00	80.00	50.00
-1	34.84	88.11	66.22
0	39.00	100.00	90.00
1	43.16	111.89	113.78
1.682	46.00	120.00	130.00

3.3.2 试验结果与分析

根据三因素五水平正交旋转组合试验方案,共实施 20 组响应面分析试验,每组试验重复进行 3 次,取 3 次测试结果的平均值作为试验结果,如表 3 所示,X_1、X_2、X_3为因素编码值。

运用数据处理软件 Design-Expert 11.0.4 对试验数据进行多元回归拟合,得肥料颗粒出肥口处垂直于水平方向速度的二次回归模型为

$$v_z = 1.58 - 0.091\,5X_1 - 0.017\,5X_2 - 0.016\,5X_3 - 0.013X_1X_2 - 0.001\,3X_1X_3 + 0.009\,7X_2X_3 - 0.049\,5X_1^2 - 0.004\,7X_2^2 + 0.002X_3^2 \quad (7)$$

对二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 4 所示。

表 3 二次正交旋转组合试验方案与结果

Tab. 3 Test scheme and result of experiment

试验序号	因素			v_z/(m·s^{-1})
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	1.683 6
2	1	-1	-1	1.487 5
3	-1	1	-1	1.600 2
4	1	1	-1	1.408 2
5	-1	-1	1	1.583 2
6	1	-1	1	1.437 7
7	-1	1	1	1.594 4
8	1	1	1	1.341 1
9	-1.682	0	0	1.592 7
10	1.682	0	0	1.317 3
11	0	-1.682	0	1.579 1
12	0	1.682	0	1.584 1
13	0	0	-1.682	1.601 4
14	0	0	1.682	1.599 9
15	0	0	0	1.515 8
16	0	0	0	1.578 9
17	0	0	0	1.604 9
18	0	0	0	1.571 5
19	0	0	0	1.599 0
20	0	0	0	1.604 1

表 4 回归方差分析

Tab. 4 Variance analysis of regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
回归	0.160 5	9	0.017 8	10.81	0.000 5**
X_1	0.114 4	1	0.114 4	69.34	0.141 4
X_2	0.004 2	1	0.004 2	2.55	0.163 8
X_3	0.003 7	1	0.003 7	2.26	0.388 0
X_1X_2	0.001 3	1	0.001 3	0.814 6	0.927 6
X_1X_3	0	1	0	0.008 7	0.516 3
X_2X_3	0.000 7	1	0.000 7	0.452 7	0.163 4
X_1^2	0.035 3	1	0.035 3	21.39	0.000 9**
X_2^2	0.000 3	1	0.000 3	0.196 0	0.667 4
X_3^2	0.000 1	1	0.000 1	0.034 9	0.855 6
残差	0.016 5	10	0.130 5		
失拟	0.010 7	5	0.001 7	1.97	0.254 5
误差	0.005 8	5	0.002 1		
总和	0.177 0	19	0.001 2		

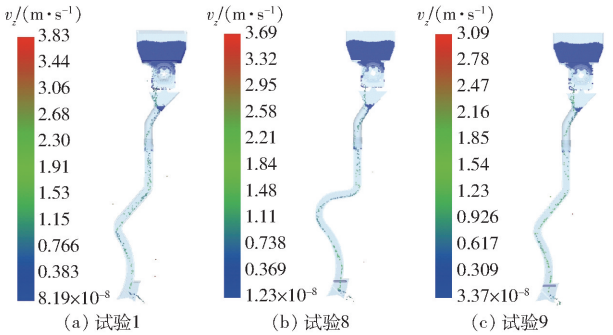
注:**表示差异极显著($P<0.01$)。

由表 4 分析可知,建立二次回归模型的 $P<0.01$,表明回归模型极显著;失拟项 $P>0.05$,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符,能正确反映所测肥料颗粒速度 v_z 与 X_1、X_2、X_3 之间的关系,回归模型可较好地对试验中各种试验结果进行预测。其中模型的二次项 X_1^2 极显著,其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小,可得到各因素对 v_z 的影响由大到小顺序为 X_1、X_2、X_3。

3.3.3 肥料流动过程分析

肥料颗粒在施肥铲内流动受颗粒间碰撞以及与

铲壁摩擦和碰撞等作用的影响。在 EDEM 后处理中以肥料颗粒的流动速度为指标，为肥料颗粒添加颜色标识，肥料颗粒在铲内流动时速度的变化状态如图 5 所示。由肥料颗粒在铲内流动时颜色的变化可知，运动过程中受摩擦力和种群间作用力影响时肥料颗粒速度会有上下波动，而肥料颗粒与铲体内壁发生非弹性碰撞的瞬间，肥料颗粒的动能损失速度急剧减小，完成碰撞肥料颗粒离开铲壁后，肥料颗粒在重力作用下速度逐渐增大。



(a) 试验1　(b) 试验8　(c) 试验9

图 5　不同组合下肥料颗粒速度变化状态

Fig. 5　Variation of fertilizer particle velocity under different combinations

为进一步分析肥料颗粒速度及动能在铲内流动时的变化情况，选取试验序号为 1(－1，－1，－1)、8(1，1，1)、9(－1.682，0，0)的 3 组仿真数据，在各组随机选取 10 粒落入施肥铲并从出肥口流出的肥料颗粒，统计其平均速度数据，获得肥料颗粒群体平均速度与时间关系曲线，如图 6 所示。

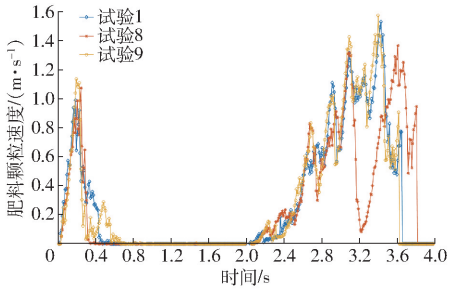


图 6　肥料颗粒群体平均速度与时间的关系曲线

Fig. 6　Relationship curves between average population velocity of fertilizer particles and time

由图 6 可知，时间以 2 s 为分界点，2 s 前为肥料颗粒生成过程。肥料颗粒生成时受重力作用，向肥箱底部下落时速度不断增大，随着肥料颗粒不断堆积平均速度减小，落入肥箱底部时速度为零；2 s 时排肥器开始转动，肥料颗粒下落并进入导肥管，约 3 s 时再运动至施肥铲。在施肥铲内受重力、摩擦力、颗粒间碰撞、颗粒与管壁碰撞等因素影响速度发生变化；不同参数的施肥铲中肥料颗粒运动速度变化不同，取肥料颗粒进入施肥铲后的运动参数进行分析，如图 7 所示。图中①、②、③、④分别表示肥料颗粒与过渡段上端圆弧、过渡段下端圆弧、施肥铲入土段及出肥口处导流板发生碰撞、流向变化的时间节点。

约在 3.0 s 时，肥料颗粒运动至铲柄段。约在 3.1 s 时，肥料颗粒落入过渡段上端圆弧处，与铲体内壁随机碰撞后变向(点①)，沿过渡段流动。施肥铲入土段上端圆弧圆心角 θ_2 越大，过渡段与水平方向夹角约小，颗粒在此处的动能损失越大，流动速度越小，且肥料颗粒在过渡段运动加速度减小，导致肥料颗粒流出施肥铲的时间增加；图中试验 8 的施肥铲入土段上端圆弧圆心角 θ_2 取上水平值，因此其运动速度低于试验 1 和试验 9，且肥料颗粒在施肥铲内运动的时间长于试验 1 和试验 9。

约在 3.2 s 后，试验 8 中肥料颗粒速度下降至最低(点②)，而试验 1 和 9 中肥料颗粒约在 3.3 s 时速度下降至最低，其原因是试验 8 施肥铲的过渡段下端圆弧直径较大，肥料颗粒较早进入该铲体过渡段下端圆弧，与铲内壁发生碰撞，速度下降；而试验 1 和试验 9 的圆弧直径较小，肥料颗粒仍然在过渡段倾斜向下运动，速度持续增加。肥料颗粒在下圆弧过渡段碰撞减速后变向(点③)，由下圆弧段流出，速度在重力作用下增大；进入施肥铲入土圆弧段后，在重力及铲内壁碰撞的影响下，速度出现随机波动，整体呈减速趋势，流向出肥口；与出肥口处导流板碰撞反弹下落(点④)，至弹出仿真边界后速度为零。

3.4　试验因素影响效应分析

根据式(7)得到各因素交互作用对肥料颗粒速度的响应曲面图[28]，如图 8 所示。

由图 8a、8b 可知，θ_2 的变化相较于 d_1 和 d_2 对出肥口处肥料颗粒速度的影响较大。d_1 和 d_2 一定时随

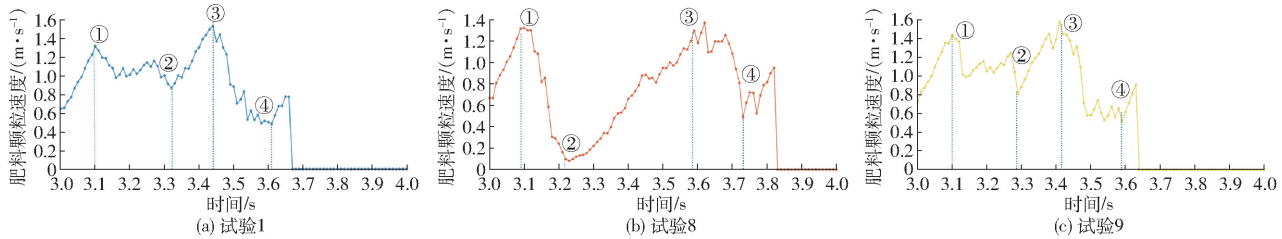


图 7　稳定阶段肥料颗粒速度与时间关系曲线

Fig. 7　Relationship curve between particle velocity and time in stable stage

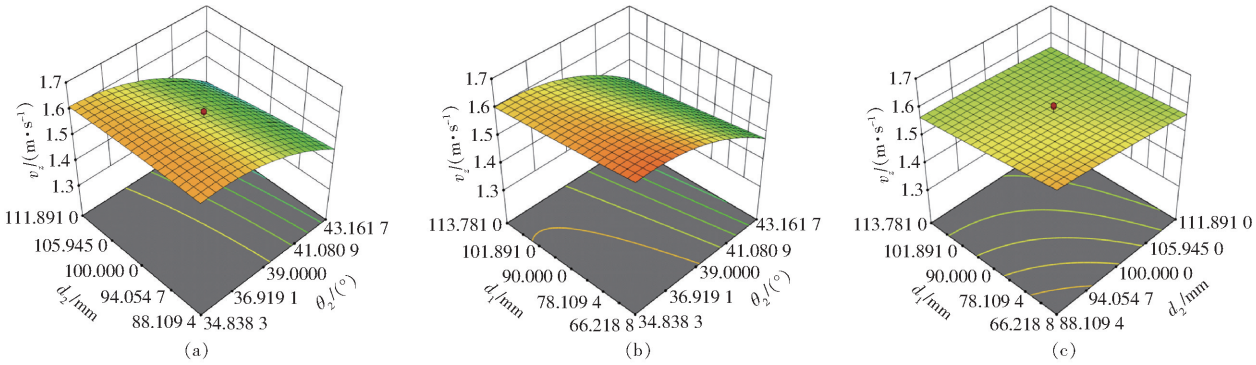


图 8 交互因素对肥料颗粒速度的响应曲面

Fig. 8 Response surfaces of fertilizer particle velocity to interactive factors

θ_2的增大,v_z呈先增后减趋势,产生该现象的主要原因是当定位参数 H 与 L 确定时,θ_2越大,施肥铲体过渡段整体越为平缓,过渡段中间直线斜率越小,肥料颗粒由铲柄进入过渡段时易堆积于该位置,影响肥料颗粒在铲内流动性。

由图 8c 可知,当 θ_2处于零水平(39°),d_1、d_2分别位于 66 ~ 84 mm 和 88 ~ 100 mm 范围内时肥料颗粒的流动速度较快,且两项交互作用对肥料颗粒速度的影响不显著,与方差分析结果相同。

肥料颗粒流动速度反映施肥铲工作性能,为保证施肥装置工作时颗粒肥料能顺利流出,在试验范围内要求流动速度尽可能大,应用 Design-Expert 11.0.4 软件中 Optimization - Graphical 模块对回归方程模型进行该目标下优化求解,得到施肥铲体各影响因素最优组合参数范围如图 9 所示,响应指标速度最大时最优解为:X_1 = 36.155 2、X_2 = 93.083 6、X_3 = 66.218 8。选取优化设计参数:θ_2 = 36°、d_2 = 93 mm、d_1 = 66 mm。

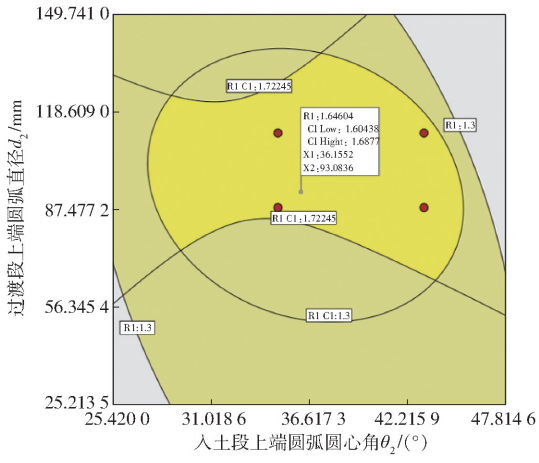


图 9 优化参数分析图

Fig. 9 Diagram of parameters optimization and analysis

4 田间试验

4.1 土壤黏附量

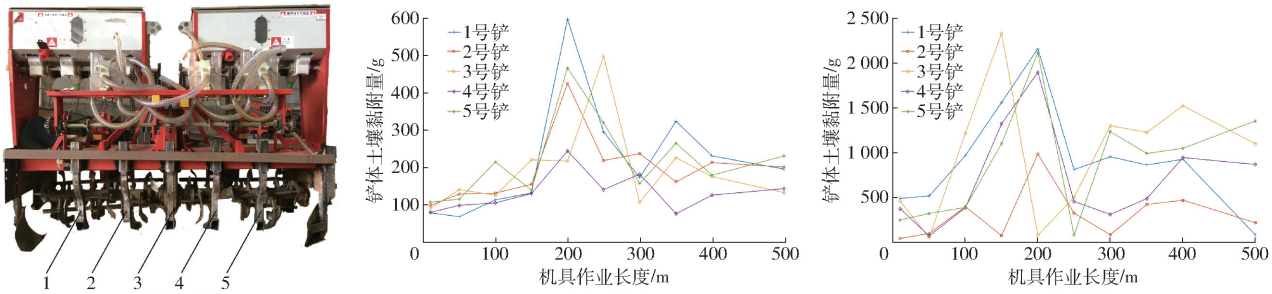
为验证优化设计结果,分别于 2019 年 9 月 23 日、10 月 12 日在华中农业大学现代农业科技试验基地和湖北省监利县华中农业大学稻油轮作全程机械化生产示范基地开展田间试验。试验地表为全喂入联合收获机收获后稻茬田,土壤类型为黄棕壤,试验前未对地表残茬进行清理,田块特性参数见表 5。配套动力为东方红 954 型拖拉机,机组以慢Ⅱ挡作业,通过预试验确定拖拉机液压手柄位置与机具旋耕深度的关系,调节油门使发动机以额定转速工作,保证作业速度一致。试验机组沿直线方向每厢作业距离为 50 m,当机组每工作到预定长度后将黏附在各个铲体的土壤秸秆混合物刮下装入自封袋中称量,每组试验重复 3 次取其平均值,对应试验铲标号和黏附量测量结果如图 10 所示,作业后的地表状态及铲体黏附形态如图 11 所示。

表 5 田块特性参数

Tab. 5 Characteristics parameters of experimental field

参数	工况 1	工况 2
平均土壤含水率(1 ~ 25 cm)/%	16.02	26.80
平均土壤坚实度(1 ~ 25 cm)/kPa	2 568.7	758.9
容重/(g·cm^{-3})	1.53	1.12
平均留茬高度/cm	45	32
秸秆覆盖量/(kg·m^{-2})	1.23	1.57

由测定的黏附量和施肥铲黏附形态可知,铲体出现了适度黏附,特别是土壤含水率较高、秸秆量较大情况下,黏附量会增大。从地表形态看,未出现壅土、拖沟等情况,表明机具的通过性良好。当机具工作长度为 150 ~ 250 m 时铲体土壤黏附出现最大值,随工作长度的增加,黏附量下降,单个铲体黏附量保持在 1.5 kg 以下,并存在随机的波动;表明施肥铲包络旋耕刀,但留有间隙,土壤秸秆混合物会黏附在铲体上,累积到一定量后,依据工作原理旋耕刀会主动刮走黏附在铲体上的土壤秸秆混合物,保证机具正常作业。试验发现黏附主要集中在铲尖部位,铲体与土壤、秸秆发生摩擦、挤压,在铲尖形成一层不易脱落的土壤秸秆混合黏附层,包裹住铲尖一部分,



(a) 铲体编号　(b) 工况1　(c) 工况2

图 10　两种工况下铲体土壤黏附量

Fig. 10　Soil adhesion of shovel under two working conditions



(a) 工况1地表形态　(b) 工况2地表形态　(c) 工况1铲体黏附形态　(d) 工况2铲体黏附形态

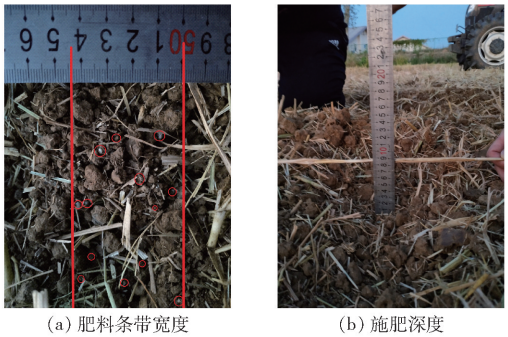
图 11　两种工况作业后地表及铲体黏附形态

Fig. 11　Soil surfaces morphology and adhesion form of shovel body under two working conditions

在机具作业过程中，黏附层代替铲尖与土壤耕层进行开沟作业，可避免铲尖磨损。

4.2　施肥深度合格率及断条率

根据行业标准 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》，在同一厢面内选取 5 个点，每个点长度为 5 m，人工扒开土层测量施肥深度及断条长度，每组试验重复 3 次，对肥料条带的位置深度数据进行整理，结果为：目标施肥深度 100 mm，施肥深度平均值 91.10 mm，施肥深度误差 8.90 mm，施肥深度标准差 5.60 mm，施肥深度合格率 93.33%，施肥深度变异系数 6.16%，施肥断条率 1.08%。肥料颗粒实际施用深度平均为 91.10 mm，肥带宽度平均为 43.50 mm，满足油菜深施肥农艺要求；施肥深度合格率 93.33%，施肥断条率为 1.08%，满足 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》作业性能指标，有效实现了深施肥功能，试验效果如图 12 所示。



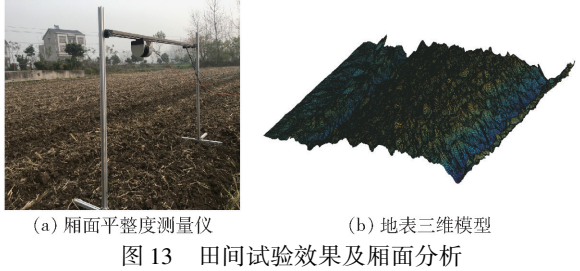
(a) 肥料条带宽度　(b) 施肥深度

图 12　施肥铲施肥效果

Fig. 12　Effect of fertilizer shovel on fertilization

4.3　厢面平整度

利用地表微地貌测量装置[29]，在拖拉机 1.8、2.3 km/h 速度作业后的地表分别选取 3 个测量点，测量该处厢面平整度，测量装置及作业效果如图 13a 所示，测量数据如表 6 所示。



(a) 厢面平整度测量仪　(b) 地表三维模型

图 13　田间试验效果及厢面分析

Fig. 13　Effect and surface analysis of field test

表 6　厢面平整度试验结果

Tab. 6　Flatness test results

工作速度/(km·h^{-1})	平整度/mm			
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	平均值
1.8	16.76	19.83	17.30	17.96
2.3	24.48	20.45	19.17	21.37

激光雷达移动过程中扫描的数据点为在极坐标系内扫描仪中心与地表的垂直距离，取水平地表为基准参考平面，进行坐标系转换及基准变换，得到转换后直角坐标系内各数据点坐标

$$\begin{cases} x_j = M_j\cos(\varphi_j\pi/180) \\ y_j = l_b - M_j\sin(\varphi_j\pi/180) \end{cases} \tag{8}$$

式中　x_j——直角坐标系中各扫描点 X 轴坐标值，mm

y_j——直角坐标系中各扫描点 Y 轴坐标值,mm

l_b——激光雷达扫描中心与地表水平面基准线的垂直距离,mm

M_j——极坐标中各扫描点对应的坐标值,mm

φ_j——极坐标中各扫描点对应的采样角度,范围为 45°~135°

对获取的测量数据进行有效区域提取和误差补偿处理后,利用 Matlab 生成地表三维模型,如图 13b 所示,测量结果与实际地表高度变化吻合。选取厢面有效区域数据并计算其标准差即为厢面平整度。选取拖拉机速度 1.8、2.3 km/h 下测量的 3 组数据平均值,得到机具作业后厢面平整度为 17.96 ~ 21.37 mm,施肥开沟器对厢面造成的扰动较小,厢面质量达到油菜播种要求[30]。

5 结论

(1)设计了一种适应于稻油轮作区油菜直播的主动防堵深施肥装置,施肥装置与油菜精量联合直播机配套使用,通过施肥铲体结构包络旋耕刀片末端运动轨迹,通过旋耕刀片主动刮削黏附在铲体的土壤秸秆混合物,实现主动防堵功能。

(2)通过分析包络式施肥铲结构曲线和工作要求,确定了施肥铲的结构设计准则:在满足刮削防堵条件下保证肥料颗粒在铲内的运动流畅,建立了包络式施肥开沟器结构设计优化数学模型,确定了包络式施肥铲优化设计关键参数及取值范围为:入土圆弧段圆心角 θ_2 为 32°~46°、过渡段上端圆弧直径 d_2 为 80~120 mm、过渡段下端圆弧直径 d_1 为 50~130 mm。

(3)通过离散元仿真,分析了施肥铲结构关键参数对肥料颗粒运动状态的影响;结合二次旋转正交组合试验方法,分析确定影响施施肥铲内肥料流动性能的因素由大到小依次为过渡段下端圆弧直径 d_1、过渡段上端圆弧直径 d_2、入土段上端圆弧段圆心角 θ_2。建立了肥料颗粒流动速度与施肥开沟器过渡段圆弧直径 d_1、d_2 及入土段上端圆弧圆心角 θ_2 的二次多项式回归模型,计算得到施肥开沟器最佳设计参数为:$\theta_2=36°$、$d_2=93$ mm、$d_1=66$ mm。

(4)田间试验表明,安装深施肥装置的联合直播机具有良好的田间通过性能,不同作业条件下机具工作性能满足施肥播种机行业标准。机具作业后单个施肥铲体上土壤秸秆混合物黏附量保持在 1.5 kg以下,施肥深度平均值 91.10 mm,施肥深度合格率为 93.33%,施肥断条率为 1.08%,厢面平整度为 17.96~21.37 mm,有效实现油菜深施肥并整备了良好的种床。

参 考 文 献

[1] 张哲,殷艳,刘芳,等. 我国油菜多功能开发利用现状及发展对策[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):618-623.
ZHANG Zhe, YIN Yan, LIU Fang, et al. Current situation and development countermeasures of Chinese rapeseed multifunctional development and utilization[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5):618-623. (in Chinese)

[2] 吴崇友. 稻油(麦)轮作机械化技术[M]. 北京:中国农业出版社,2013.

[3] 金继运,李家康,李书田. 化肥与粮食安全[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(5):601-609.
JIN Jiyun, LI Jiakang, LI Shutian. Chemical fertilizer and food security[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2006, 12(5): 601-609. (in Chinese)

[4] 汪波,宋丽君,王宗凯,等. 我国饲料油菜种植及应用技术研究进展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):695-701.
WANG Bo, SONG Lijun, WANG Zongkai, et al. Production and feeding technology of fodder-rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 695-701. (in Chinese)

[5] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进[J]. 中国农业科学,2008,41(2):450-459.
YAN Xiang, JIN Jiyun, HE Ping, et al. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(2):450-459. (in Chinese)

[6] 谷晓博,李援农,杜娅丹,等. 施肥深度对冬油菜产量、根系分布和养分吸收的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):120-128,206.
GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan, et al. Effects of fertilization depth on yield, root distribution and nutrient uptake of winter oilseed rape(*Brassica napus* L.)[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(6): 120-128,206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160616&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.016. (in Chinese)

[7] 张岳芳,周炜,王子臣,等. 氮肥施用方式对油菜生长季氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2013,32(8):1690-1696.
ZHANG Yuefang, ZHOU Wei, WANG Zichen, et al. Effects of nitrogen fertilizer application modes on nitrous oxide emissions during growing season of oilseed rape (*Brassica napus*)[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(8): 1690-1696. (in Chinese)

[8] 张智,丛日环,鲁剑巍. 中国冬油菜产业氮肥减施增效潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(6):1494-1504.
ZHANG Zhi, CONG Rihuan, LU Jianwei. Potential analysis on winter oilseed rape production under reducing nitrogen input and increasing its efficiency in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(6):1494-1504. (in Chinese)

[9] 鲁剑巍,任涛,丛日环,等. 我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):712-720.
LU Jianwei, REN Tao, CONG Rihuan, et al. Prospects of research on fertilization status and technology of rapeseed in China

[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5):712 - 720. (in Chinese)
[10] 余常兵,谢立华,胡小加,等. 油菜氮肥的轻简施用技术[J]. 中国油料作物学报, 2012,34(6): 633 - 637.
YU Changbing, XIE Lihua, HU Xiaojia, et al. Simplified application technique of nitrogen fertilizer on rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(6): 633 - 637. (in Chinese)
[11] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 氮磷钾硼肥施用对长江流域油菜产量及经济效益的影响[J]. 作物学报,2009,35(1):87 - 92.
ZOU Juan, LUO Jianwei, CHEN Fang, et al. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on yield and profit of rapeseed (*Brassica napus* L.) in the Yangtze river basin[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(1):87 - 92. (in Chinese)
[12] VAMERALI T, BERTOCCO M, SARTORI L. Effects of a new wide-sweep opener for no-till planter on seed zone properties and root establishment inmaize(*Zea mays*,L.): a comparison with double-disk opener[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89(2): 196 - 209.
[13] JOHAN A, OLOF H. Specific draught, soil fragmentation and straw incorporation for different tine and share types[J]. Soil and Tillage Research, 2010,110(1): 154 - 160.
[14] AILI H, CHEN Ying. Soil disturbance and draft force of selected seed openers[J]. Soil and Tillage Science, 2014,140: 48 - 54.
[15] 杨然兵,杨红光,连政国,等. 马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):104 - 113.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, LIAN Zhengguo, et al. Design and experiment of separated layer fertilization furrow opener for potato planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):104 - 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.012. (in Chinese)
[16] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 基于旋耕覆土的冬小麦基肥分层定深施用装置设计[J]. 农业工程学报,2018,34(13):18 - 26.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Design of stratified and depth-fixed application device of base-fertilizer for winter wheat based on soil-covering rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13):18 - 26. (in Chinese)
[17] 祝清震,武广伟,安晓飞,等. 基肥定深施用装置排肥口位置与施肥深度关系模型[J]. 农业工程学报,2018,34(13):8 - 17.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, AN Xiaowei, et al. Relationship model of fertilizer outlet location and fertilizer application depth of depth-fixed application device of base-fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13):8 - 17. (in Chinese)
[18] 曾山,汤海涛,罗锡文,等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(20):12 - 19.
ZENG Shan, TANG Haitao, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20):12 - 19. (in Chinese)
[19] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):10 - 16.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the CSAE,2015, 31(3):10 - 16. (in Chinese)
[20] 田波平,廖庆喜,黄海东,等. 2BFQ - 6 型油菜精量联合直播机的设计[J]. 农业机械学报,2008,39(10): 211 - 213.
TIAN Boping, LIAO Qingxi, HUANG Haidong, et al. Design of 2BFQ - 6 precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):211 - 213. (in Chinese)
[21] 廖宜涛,廖庆喜,张青松. 2BFQ - 6 型油菜精量联合直播机故障特性研究[J]. 机械强度,2017,39(2): 321 - 326.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHANG Qingsong. Fault characteristics analysis of 2BFQ - 6 precision seeder for rapeseed[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017,39(2):321 - 326. (in Chinese)
[22] 西涅阿科夫. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 李清桂,高尔光,张先达,等,译. 北京:中国农业机械出版社,1981.
[23] 许春林. 北方大型联合整地机设计与试验[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.
[24] 丁为民,彭嵩植. 旋耕刀滑切角及滑切角方程的研究[J]. 农业工程学报,1995,11(4):67 - 72.
DING Weimin, PENG Songzhi. Research on grass-removing angles and equations rotary blades[J]. Transactions of the CSAE, 1995,11(4):67 - 72. (in Chinese)
[25] 丁为民,王耀华,彭嵩植. 反转旋耕刀滑切角分析与计算[J]. 农业机械学报,2001,32(6):26 - 29,21.
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Calculation and analysis of grass removing angles of up-cut rotary blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(6):26 - 29,21. (in Chinese)
[26] 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):163 - 169.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):163 - 169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)
[27] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报,2018,34(18): 21 - 27.
YUAN Quanchun, XU Liming, XING Jiejie, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18):21 - 27. (in Chinese)
[28] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):83 - 90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(1):83 - 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)
[29] 刘立超,魏国梁,张青松,等. 基于激光雷达的农业耕作微地貌测量装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):84 - 92.
LIU Lichao, WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of microtopography measuring device for agricultural cultivation based on LiDAR[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7): 84 - 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190708&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.008. (in Chinese)
[30] NT/Y 2709—2015 油菜播种机 作业质量[S]. 2015.