

土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机设计与试验

郑侃<sup>1,2</sup> 刘国阳<sup>1</sup> 国立伟<sup>1</sup> 程健<sup>1</sup> 夏俊芳<sup>1,2</sup> 李宇飞<sup>1,2</sup>

(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:** 为实现长江中下游农业区宽苗带小麦少耕播种需求,本研究结合区域小麦种植农艺特点,设计一种土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机。通过对表土盖种装置结构与抛土运动学分析,设计耕抛刀辊结构参数,得到覆盖种带运动学条件;通过对沟土匀摊装置结构及螺旋叶片作用下土壤受力与速度分析,设计沟土匀摊装置结构参数,明确影响播种深度与其稳定性关键因素为终止螺旋极径、螺距、螺旋叶片转速。以播种深度合格率与播种深度稳定性系数为评价指标,运用离散元仿真结合中心组合正交试验,建立播种深度合格率与播种深度稳定性系数回归方程,确定较优参数组合为终止螺旋极径 119 mm、螺距 140 mm、螺旋叶片转速 98 r/min,此时,播种深度合格率为 86.38%、播种深度稳定性系数为 78.84%。在稻茬离田与稻茬还田两种模式下田间试验表明,机具作业运行稳定,厢沟质量满足小麦后期生长排水需求,镇压辊滑移率良好,试验过程未出现稻茬、秸秆缠绕堵塞现象;两种模式下播种深度合格率分别为 83.12%、80.67%;播种深度稳定性系数分别为 74.78%、72.25%,满足长江中下游农业区宽苗带小麦少耕播种标准和农艺要求。

**关键词:** 小麦播种机;少耕;土壤分流;宽苗带

**中图分类号:** S223.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2022)02-0128-11

**OSID:**



Design and Experiment of Wide-boundary Seldom-tillage Wheat Planter with Soil-shunting Function

ZHENG Kan<sup>1,2</sup> LIU Guoyang<sup>1</sup> GUO Liwei<sup>1</sup> CHENG Jian<sup>1</sup> XIA Junfang<sup>1,2</sup> LI Yufei<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** To realize the demand of wide-boundary wheat sowing with seldom-tillage in the middle and lower reaches of Yangtze River agricultural zone, a wide-boundary seldom-tillage wheat planter with soil-shunting function was designed based on the regional wheat growing agronomic characteristics. By analyzing the structure of the seed covering device and kinematics of soil particle, the structural parameters of the blade roller were designed and the kinematic requirements of seed covering were obtained. The structure and dynamics of the uniform distribution device for furrow soil and force and velocity analysis of soil particles under the spiral blade were analyzed to design the uniform distribution device structural parameters. The key factors affecting the sowing depth and stability were clarified, including the termination spiral pole diameter, pitch and spiral blade speed. Using the sowing depth qualification rate and sowing depth stability coefficient as the evaluation index, the regression equation of sowing depth qualification rate and sowing depth stability coefficient was established by using discrete element simulation combined with central combination orthogonal experiment. The optimal combination of parameters was obtained as follows, the termination spiral pole diameter, pitch and spiral blade speed were 119 mm, 140 mm and 98 r/min, respectively. Under the optimal combination of parameters, the seed depth qualification rate was 86.38% and the seed depth stability coefficient was 78.84%. The field experiment results in two modes with and without straw showed that the operation of the machine was stable, the quality of the furrow met the later growth and drainage needs of wheat, the sliding rate of the

收稿日期: 2021-10-27    修回日期: 2021-12-09

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31901412)和中央高校基本科研业务费专项基金项目(2662018QD033)

**作者简介:** 郑侃(1987—),男,讲师,博士,主要从事稻麦轮作耕播技术与装备研究,E-mail: zhengkan@mail.hzau.edu.cn

**通信作者:** 夏俊芳(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

pressing roller was good, and the stubble and straw did not entangle or block the seeder during the experiment. Under the two modes, the sowing depth qualification rates were 83.12% and 80.67%, and the seed depth stability coefficients were 74.78% and 72.25%, respectively, which satisfied the agronomic requirements.

**Key words:** wheat planter; seldom-tillage; soil-shunting; wide-boundary

## 0 引言

小麦是长江中下游农业区重要的种植作物,种植制度多为稻麦轮作,因稻田土壤湿度大、黏重板结,不适合小麦传统精细化种植<sup>[1-2]</sup>。宽苗带小麦种植方式为无垄撒播与条播的结合,苗带宽度增至 8~10 cm,可降低苗带小麦群体密度,改善小麦个体对水、肥、光、温、气、土壤的利用,提高小麦单产与品质<sup>[3-6]</sup>。因此,适用的播种机是长江中下游农业区采用宽苗带小麦种植方式的关键。

近年来,相关学者围绕宽苗带小麦少耕播种机的整机与关键部件开展研究。在宽苗带小麦播种机方面,胡红等<sup>[7]</sup>提出种-肥-种机结构思路,研制出稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机,改善了机具通过性,提高了种肥合格率;姜萌等<sup>[8]</sup>设计了前旋耕后施肥播种的小麦宽苗带精量播种施肥机;XI 等<sup>[9]</sup>设计的无排种管式宽苗带小麦播种机,由双旋耕、镇压、播种、施肥、覆土、再镇压、开沟等部件组成,提高了小麦播种精度;SHI 等<sup>[10]</sup>研制的宽苗带小麦少耕播种机,采用秸秆粉碎、种带清秸、条带旋耕、施肥播种、覆土镇压等多道处理。在关键部件方面,祝清震等<sup>[11]</sup>将撒播器弹籽板形状由平面优化为球面,降低了小麦横向均匀性变异系数;刘俊孝等<sup>[12]</sup>利用气吸取种原理,研发了针孔管式小麦精准点播装置,保证了宽苗带播量、播深及株距的均匀度;XU 等<sup>[13]</sup>在排种口底板上表面安装凸起,改善了种子分布均匀性。以上研究为提升宽苗带小麦少耕播种机作业性能奠定了基础。由于长江中下游农业区雨水充沛、集中,小麦渍害严重,需提前开出厢沟,沟土堆积厢体上,采用宽苗带小麦种植方式时播种深度合格率与播种深度稳定性无法保证。

为提高宽苗带小麦种植播种深度合格率和播种深度稳定性,结合区域农艺要求,提出一种表土盖种-沟土匀摊的土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机。设计表土盖种装置与沟土匀摊装置等关键部件,利用虚拟仿真优化关键参数,并进行田间试验验证,以期长江中下游农业区宽苗带小麦种植提供适合机具。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机整体结构如

图 1 所示,主要由表土盖种装置、肥箱、种箱、沟土匀摊装置、宽苗带撒种装置、开沟修整装置、镇压装置、变速箱与施肥装置组成。表土盖种装置置于机具前部,其关键部件左、右耕抛刀辊对称安装在变速箱下方;变速箱通过侧传动驱动耕抛刀辊后部的沟土匀摊装置反转;开沟修整装置位于沟土匀摊装置后方,与变速箱位置正对应,开沟深度可调;镇压装置在机具后部,与机架铰接。

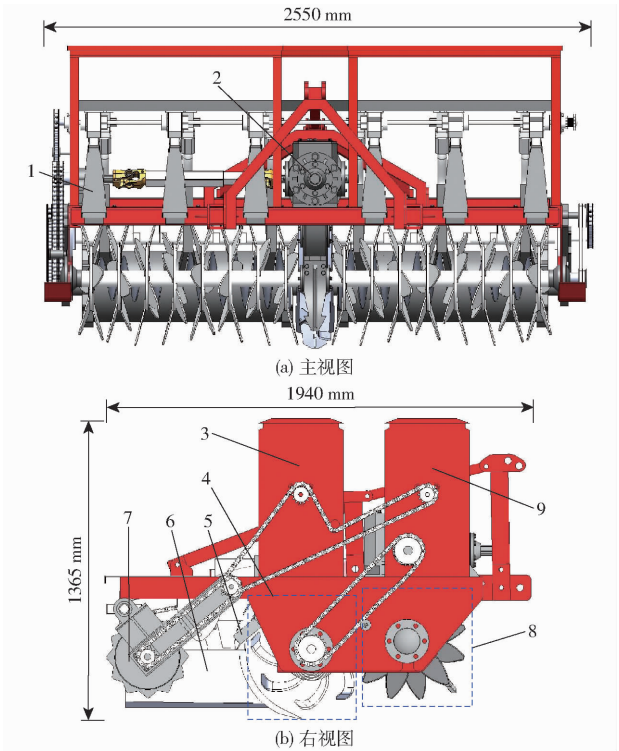


图 1 土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机结构图  
Fig.1 Structure schematics of wide-boundary seldom-tillage wheat planter with soil-shunting function

1. 施肥装置 2. 变速箱 3. 种箱 4. 沟土匀摊装置 5. 宽苗带撒种装置 6. 开沟修整装置 7. 镇压装置 8. 表土盖种装置 9. 肥箱

### 1.2 工作原理

土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机工作原理如图 2 所示。作业时,颗粒肥通过施肥装置撒施在机具前部的未耕区;小麦播种方式采用不接触地表的宽苗带撒播方式,将麦种均匀撒播在盖种区中宽度 8 cm 的种带上;表土盖种装置中耕抛刀辊完成切茬、碎土、混合土肥等作业,同时将部分土壤混合物越过沟土匀摊装置中的螺旋平整部件抛向盖种区,覆盖在种带上;沟土匀摊装置中的圆盘开沟部件与

开沟修整装置配合在已耕区开出厢沟,并将沟土移至厢沟两侧(图2中红色阴影区域),螺旋平整部件均匀平摊沟土,形成平整的种床;镇压装置对已完成土壤覆盖的盖种区进行压实。整机实现表土与沟土分流,保证了播种深度合格率与播种深度稳定性。

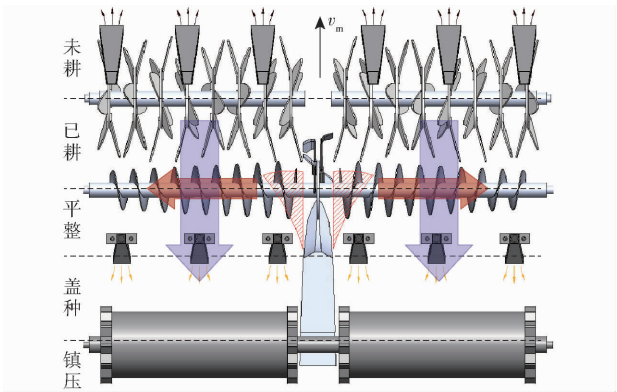


图2 整机工作原理图

Fig.2 Schematic of machine working principle

2 关键部件设计

2.1 表土盖种装置

表土盖种不均匀,播种小麦易形成露籽与深籽现象,研究表明长江中下游农业区小麦播种深度1~3 cm时为最适播深,能够显著提高小麦出苗率<sup>[14]</sup>。为此,需满足小麦种植农艺要求,确定耕抛刀辊结构参数;在此基础上,进行耕抛刀辊抛土运动学分析,明确耕抛刀辊运动学要求,实现表土盖种功能,提高播种深度合格率。

2.1.1 结构参数设计

表土盖种装置关键部件为耕抛刀辊,如图3所示,其刀盘单体主要由斜切刀、刀盘座与刀轴组成。针对稻茬田水稻收获后留茬高、秸秆量大、韧性强的特点,斜切刀要具有良好的碎茬效果。经前期研究<sup>[15]</sup>,当斜切刀刃口曲线采用偏心圆弧,刃口曲线半径取230 mm,刃角为30°,刀具厚度为6 mm,斜切部长度为170 mm时,斜切刀碎茬效果较优。

为使覆土厚度能满足长江中下游农业区小麦最适播深,需分析耕抛刀辊作用土壤过程。建立如图3a所示的 $xOy$ 坐标系,耕抛刀辊作业过程中,斜切刀运动轨迹为前进与旋转运动合成的余摆线,同一切土小区 $z'$ 把朝向相同等间距分布的斜切刀切土节距为

$$l_{P_1P_2} = \frac{2\pi v_m}{z'\omega_1} \tag{1}$$

式中  $v_m$ ——前进速度,m/s  
 $\omega_1$ ——刀盘角速度,rad/s  
 $z'$ ——同一切土小区朝向相同斜切刀数量,取3

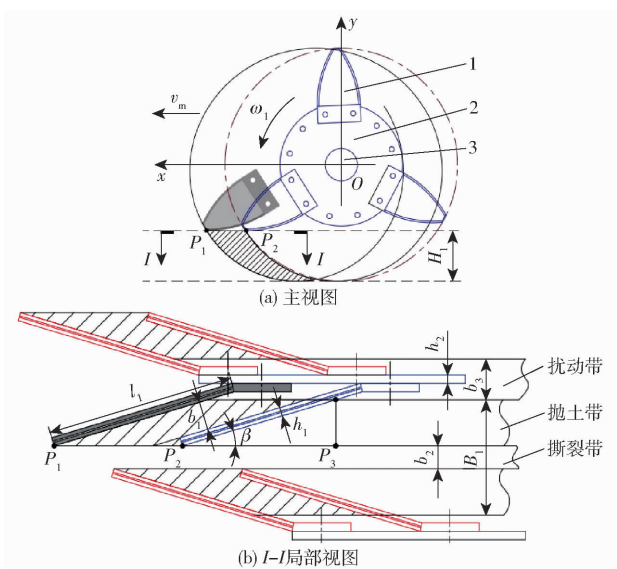


图3 耕抛刀辊作用土壤过程分析

Fig.3 Analysis of soil cutting process by blade roller

1.斜切刀 2.刀盘座 3.刀轴

由图3b可知,耕抛刀辊作用土壤后形成同一刀盘两斜切刀之间的扰动带、斜切刀碎土后的抛土带以及相邻刀盘相对斜切刀间的撕裂带,其中撕裂带与两条抛土带构成种带。根据最小势能原理,三带的土块运动到盖种区域后(图2)的平稳状态为平躺,抛土带与撕裂带厚度 $b_1$ 、 $b_2$ 需满足小麦覆土厚度1~3 cm,为保证覆盖种子土块的均匀性,设 $b_1$ 与 $b_2$ 相等,并考虑先后作业的斜切刀覆土重叠影响, $b_1$ 与 $b_2$ 取满足范围的最小值;小麦种带耕作宽度 $B_1$ 为10 cm(大于种带宽度8 cm);扰动带厚度 $b_3$ 需满足旋耕机标准(NY/T 499—2013《旋耕机作业质量》)中对碎土率要求的土块最大边长4 cm。由图3b几何关系建立多目标优化数学模型为

$$\begin{cases} \min b_1 = l_{P_1P_2} \sin\beta - h_1 \\ \min b_2 = B_1 - 2l_{P_2P_3} \tan\beta \\ b_3 = 2(l_1 \sin\beta - l_{P_2P_3} \tan\beta + h_1) + h_2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} 1\text{ cm} \leq b_1 = b_2 \leq 3\text{ cm} \\ b_3 \leq 4\text{ cm} \\ B_1 = 10\text{ cm} \end{cases} \end{cases} \tag{2}$$

式中  $\beta$ ——斜切刀弯折角,(°)  
 $h_1$ ——斜切刀厚度,mm  
 $l_{P_2P_3}$ ——斜切刀与土壤接触的最大入土深度,mm  
 $l_1$ ——斜切刀斜切部长度,mm  
 $h_2$ ——刀盘座厚度,mm

式(2)中斜切刀厚度 $h_1$ 与刀盘座厚度 $h_2$ 均取6 mm;斜切刀与土壤接触的最大入土深度 $l_{P_2P_3}$ 与耕深 $H_1$ 相等,取常用耕作深度150 mm;斜切刀斜切部

长度  $l_1$  取 170 mm; 斜切刀弯折角  $\beta$  对机具的功耗、入土性能以及斜切刀脱附能力有直接影响,  $\beta$  一般为  $5^\circ \sim 15^\circ$ <sup>[16]</sup>, 为便于加工取整数; 稻茬田适用的旋耕作业切土节距  $l_{p_1 p_2}$  取值为  $6 \sim 10$  cm<sup>[17]</sup>。代入式(2)统一运算单位求解得出, 当  $\beta$  为  $15^\circ$ 、 $l_{p_1 p_2}$  为 9.9 cm 时,  $b_1$  与  $b_2$  取最优的 1.96 cm, 此时  $b_3$  为 2.56 cm 满足作业要求。由单侧耕抛刀辊耕幅 100 cm, 求得刀盘单元 8 组, 单侧耕抛刀辊斜切刀数量 48 把; 参考旋耕刀螺旋线排列方法<sup>[18]</sup>, 得到同一螺旋线上相邻斜切刀(同向)的相位角为  $15^\circ$ 、升角为  $58^\circ$ 。

### 2.1.2 抛土运动学分析

耕抛刀辊在种带对应的未耕区进行旋切作业, 切后土壤需越过沟土匀摊装置中螺旋平整部件覆盖在种带上, 实现表土盖种分流目的。因此, 在种带内均能覆盖土壤条件下, 对斜切刀抛土进行运动学分析, 明确耕抛刀辊使土壤覆盖种带的运动学要求。如图 4 所示, 建立  $xOy$  坐标系, 选择耕深为  $H_1$  (150 mm) 即将脱离斜切刀土块  $M$ , 将  $M$  看成质点。以  $M$  为原点, 以其所在回转平面切向为  $X$  轴、 $M$  指向点  $O$  方向为  $Y$  轴, 建立动态坐标系  $XYM$ 。

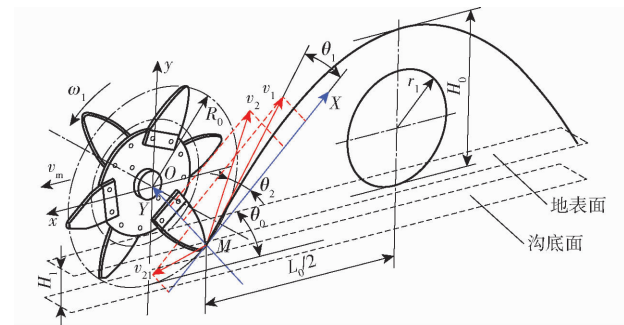


图 4 土壤运动分析

Fig. 4 Analysis of soil movement

在忽略空气阻力情况下, 假设土块随斜切刀运动到地表时脱离, 运动过程中土块间不发生碰撞。斜切刀与牵连点  $M$  运动到  $y$  轴负方向时记为 0 时刻, 运动时间  $t$  后脱离, 此时斜切刀与牵连点  $M$  速度  $v_1$  大小与方向为

$$\begin{cases} v_1 = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2} = \sqrt{v_m^2 + R_0^2 \omega_1^2 - 2v_m R_0 \omega_1 \cos(\omega_1 t)} \\ \theta = \theta_1 + \theta_0 = \arctan \frac{v_{1y}}{v_{1x}} \\ v_{1y} = R_0 \omega_1 \sin(\omega_1 t) \\ v_{1x} = R_0 \omega_1 \cos(\omega_1 t) - v_m \end{cases} \quad (3)$$

式中  $v_{1x}$ 、 $v_{1y}$ —— $v_1$  在  $x$  轴、 $y$  轴速度分量, m/s

$R_0$ —— $M$  所在回转运动圆半径, mm

$\theta$ —— $v_1$  与  $x$  轴夹角,  $(^\circ)$

$\theta_1$ —— $v_1$  与  $X$  轴夹角,  $(^\circ)$

$\theta_0$ ——斜切刀转角,  $X$  轴与  $x$  轴夹角, 等于  $\omega_1 t$ ,  $(^\circ)$

$M$  脱离刀具时绝对速度  $v_2$  为  $XYM$  动态坐标系下牵连点速度  $v_1$  与  $M$  相对于  $XYM$  动态坐标系的相对速度  $v_{21}$  的矢量和。依据相关研究可知<sup>[19]</sup>, 在动态坐标系内, 相对速度  $v_{21}$  在  $Y$  与  $X$  方向分速度分别为  $k v_1 \sin \theta_1$  与  $(1-f) v_1 \cos \theta_1$ , 其中  $k$  为土壤恢复系数, 利用 TMS-PRO 质构仪对原状土壤进行测定得到均值约为 0.4;  $f$  为瞬时摩擦因数, 利用 MXD-01 型摩擦因数测定仪测定土壤与 Q235 碳钢作用得到均值约为 0.5。运用速度矢量合成原理, 得到  $M$  脱离斜切刀绝对速度  $v_2$  大小与方向为

$$\begin{cases} v_2 = \sqrt{v_{2x}^2 + v_{2y}^2} = v_1 \sqrt{(f \cos \theta_1)^2 + [(1+k) \sin \theta_1]^2} \\ \theta' = \theta_2 + \theta_0 = \arctan \frac{v_{2y}}{v_{2x}} + \omega_1 t \\ v_{2y} = (1+k) v_1 \sin \theta_1 \\ v_{2x} = f v_1 \cos \theta_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $v_{2x}$ 、 $v_{2y}$ —— $v_2$  在  $X$  轴、 $Y$  轴速度分量, m/s

$\theta'$ —— $v_2$  与  $x$  负半轴夹角,  $(^\circ)$

$\theta_2$ —— $v_2$  与  $X$  轴夹角,  $(^\circ)$

在假设条件的前提下,  $M$  脱离斜切刀后运动为  $x$  轴方向的匀速直线运动与  $y$  轴方向的匀变速直线运动合成的斜抛运动, 抛射角为  $\theta'$ 。相对脱离点,  $M$  射高  $H_0$  与射程  $L_0$  为

$$\begin{cases} H_0 = \frac{v_2^2 \sin^2 \theta'}{2g} \\ L_0 = \frac{v_2^2 \sin(2\theta')}{g} \end{cases} \quad (5)$$

结合  $\omega_1 = \pi n_1 / 30$ ,  $n_1$  为耕抛刀辊转速 (r/min), 联立式(3)~(5)可知,  $M$  射高  $H_0$  与  $\theta_0$ 、 $R_0$ 、 $v_m$  及  $n_1$  有关。由图 5a 分析可知, 为满足土壤覆盖种带宽度  $B_2$  (8 cm), 斜切刀从点  $M_1$  运动到点  $M_2$  抛射的土壤需越过沟土匀摊装置中螺旋平整部件, 即  $H_0 \geq 2r_1$  ( $r_1$  为终止螺旋极径, mm)。由图 5b 所示位置关系, 求得点  $M_1$  与点  $M_2$  对应回转运动圆半径  $R_{01}$ 、 $R_{02}$  以及斜切刀转角  $\theta_{01}$ 、 $\theta_{02}$  为

$$\begin{cases} R_{01} = R_{02} - \frac{B_2 - b_2 + h_1 \cos \beta}{2 \tan \beta} \\ R_{02} = R_1 - \frac{h_1}{2} \sin \beta \\ \theta_{01} = \arccos \frac{R_1 - H_1}{R_{01}} \\ \theta_{02} = \arccos \frac{R_1 - H_1}{R_{02}} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $R_1$ ——斜切刀顶点回转半径, 取 300 mm

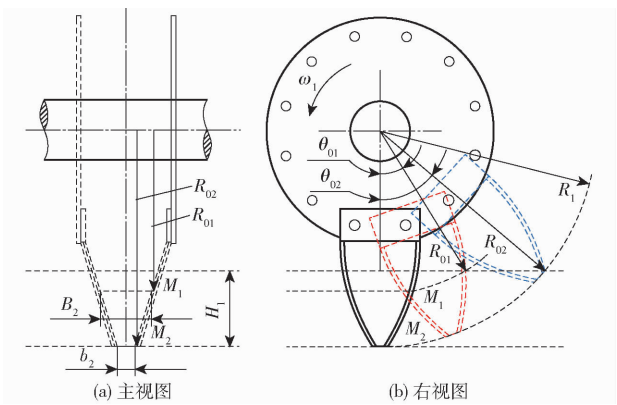


图 5 斜切刀抛土位置分析

Fig. 5 Analysis of soil throwing position of oblique cutting blade

由式(6)得出  $R_{01}$ 、 $R_{02}$  分别为 175.7、299.2 mm； $\theta_{01}$ 、 $\theta_{02}$  分别为  $31.4^\circ$ 、 $59.9^\circ$ 。在满足  $H_0 = 2r_1$  前提下,由式(3)~(5)求出  $(R_{01}, \theta_{01})$  与  $(R_{02}, \theta_{02})$  位置对应的耕抛刀辊转速  $n_{11}$ 、 $n_{12}$ ,此时  $n_1$  取  $\max \{n_{11}, n_{12}\}$ ,则斜切刀从点  $M_1$  运动到点  $M_2$  抛射的土壤均能越过螺旋平整部件,达到耕抛刀辊使土壤覆盖种带宽度 8 cm 的运动学要求。由上述分析可知,耕抛刀辊转速  $n_1$  与终止螺旋极径  $r_1$  有直接关系,考虑到长江中下游农业区土壤黏重,当终止螺旋极径  $r_1$  增大时,耕抛刀辊转速  $n_1$  也需增加,在斜切刀作用下,实际越过螺旋平整部件土壤量增加,种子覆土增厚,又因机具镇压处理,对种子的覆土压实、横移,无法精确计算出机具作业后的实际播种深度。为此,采用后续离散元仿真手段确定合适的终止螺旋极径  $r_1$ ,使土壤经耕抛刀辊与镇压装置作用后形成的小麦播种深度满足种植农艺要求。

2.2 沟土匀摊装置

开厢沟是长江中下游农业区小麦种植的必要技术,厢沟沟深、沟宽需符合排水要求,沟土能够均匀覆盖在两侧厢面上,以实现降低渍害、提高播种深度稳定性的目的。为此,以麦田厢沟要求为依据,设计沟土匀摊装置结构参数;并通过分析沟土匀摊装置关键部件作用下土壤受力与速度,确定影响播种深度稳定性关键因素,为结构参数优化奠定基础。

2.2.1 结构参数设计

如图 6 所示,沟土匀摊装置主要由旋耕刀、V 形机罩、刀座与刀盘构成的圆盘开沟部件以及螺旋平整部件组成。圆盘开沟部件以前进速度  $v_m$ 、角速度  $\omega_2$  反转将沟土破碎,沟土在旋耕刀的旋转作用下,抛至两侧螺旋平整部件前方。螺旋平整部件完成平整种床作业。小麦厢沟通常要求沟深 20~30 cm、沟宽 15~20 cm,沟壁光滑不易坍塌,沟底平整利于排水<sup>[14]</sup>。若使沟土顺利输送、平整且不塞土,设置

铲尖与开沟修整装置前端圆弧相切、螺旋叶片起始螺旋与地表线相切。由图 6 求得开沟深度  $H_2$  与开沟宽度  $B_3$  为

$$\begin{cases} H_2 = (r_3 + l_2 \tan \alpha) \cos \alpha - r_0 \\ B_3 = 2b_4 + h_3 + b_6 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $r_3$ ——V 形机罩内壁半径,mm  
 $l_2$ ——铲尖长度,mm  
 $\alpha$ ——铲尖入土角, ( $^\circ$ )  
 $r_0$ ——起始螺旋极径,mm  
 $b_4$ ——旋耕刀工作幅宽,mm  
 $h_3$ ——刀盘厚度,mm  
 $b_6$ ——刀座厚度,mm

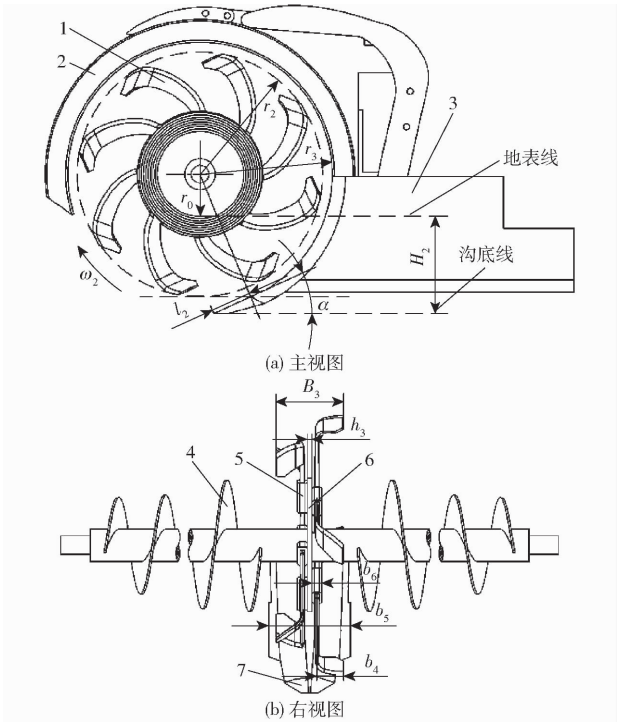


图 6 沟土匀摊装置结构示意图

Fig. 6 Structure schematics of uniform distribution device for furrow soil

1. 旋耕刀 2. V 形机罩 3. 开沟修整装置 4. 螺旋平整部件  
5. 刀座 6. 刀盘 7. 铲尖

开沟修整装置中铲尖使用宽幅的箭形深松铲,参照 JB/T 9788—2020《深松铲和深松铲柄》,铲尖长度  $l_2$  为 105 mm,铲尖入土角为  $24^\circ$ ;沟土匀摊装置中旋耕刀为稻田适用的 IIT260 型旋耕弯刀,依据 GB/T 5669—2017《旋耕机械刀和刀座》可知,旋耕刀回转半径  $r_2$  为 260 mm,旋耕刀工作幅宽  $b_4$  为 55 mm,刀座厚度  $b_6$  为 21 mm,刀盘厚度  $h_3$  选用满足强度要求的 10 mm。考虑到加工与安装误差,避免旋耕刀运动与 V 形机罩干涉,V 形机罩内壁半径  $r_3$  比旋耕刀回转半径  $r_2$  大 40 mm,即  $r_3$  为 300 mm。开沟深度  $H_2$  取 25 cm,将上述参数代入式(7)求得  $r_0$  为

67 mm、开沟宽度  $B_3$  为 141 mm。开沟修整装置两侧壁距离  $b_5$  需大于旋耕开沟宽度  $B_3$ ，以挤压沟壁，增加沟壁紧实度，使之不易坍塌， $b_5$  设置 175 mm，则实际成型的沟宽为 175 mm。

2.2.2 螺旋叶片作用下土壤受力与速度分析

圆盘开沟部件将沟土抛至厢沟两侧，靠近厢沟堆积土壤较多，若使整机直线运动的同时能实现良好的平整效果，机具由两外侧向中部逐渐增加运土量，因此螺旋平整部件中螺旋叶片采用变径等螺距螺旋线。其形成原理如图 7 所示，点  $P$  以速度  $v_3$  沿射线  $OP$  匀速向外运动，同时射线  $OP$  以角速度  $\omega_3$  匀速转动，然后再添加  $Z$  轴速度  $v_4$  的匀速直线运动，点  $P$  轨迹形成变径等螺距螺旋线。其直角坐标参数方程为

$$\begin{cases} x = \left[ r_0 + \frac{(r_1 - r_0)s}{L_1} \omega_3 t \right] \sin(\omega_3 t) \\ y = \left[ r_0 + \frac{(r_1 - r_0)s}{L_1} \omega_3 t \right] \cos(\omega_3 t) \\ z = \frac{s}{2\pi} \omega_3 t \end{cases} \quad (8)$$

式中  $s$ ——螺距，mm

$L_1$ ——螺旋叶片工作幅宽，cm

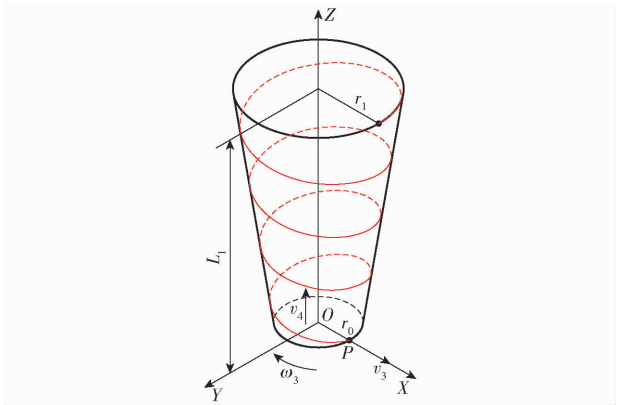


图 7 变径等螺距螺旋线形成原理

Fig. 7 Structure schematic of helical blade of variable diameter and equal pitch

式(8)变径等螺距螺旋线形状取决于  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $s$ 、 $L_1$ ，其中螺旋叶片工作幅宽  $L_1$  与单侧耕抛刀辊耕幅对应，为 100 cm。由图 8 螺旋叶片展开图结合式(8)，可得螺旋升角  $\delta$  为

$$\delta = \arctan \frac{dz}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} = \arctan \frac{s}{2\pi \left[ r_0 + \frac{(r_1 - r_0)s}{L_1} \omega_3 t \right]} \quad (9)$$

在螺旋叶片的作用下土壤的受力与速度，影响种床平整效果。因土壤在输送过程中受力和速度相对复杂，简化螺旋叶片上输送的土壤颗粒为质点，以

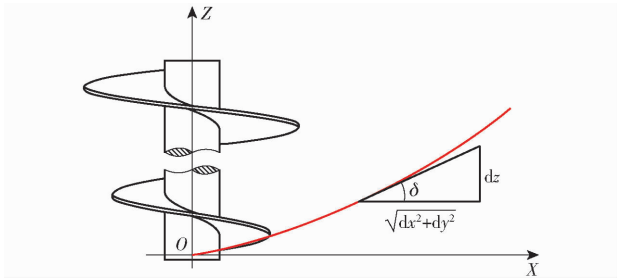


图 8 螺旋叶片展开图

Fig. 8 Unfolding diagram of spiral blade

机组为参考系，质点为原点  $O$ ，土壤颗粒所在回转圆的切向为  $Y$  轴，螺旋叶片横向输送土壤方向为  $Z$  轴负半轴，建立如图 9 所示的坐标系。土壤颗粒合力  $F$  由螺旋叶片的法向推力  $F_N$ 、切向摩擦力  $F_f$  与地表对其的摩擦力  $f_0$  合成，其中  $F_N$  与螺旋叶片转速  $n_2$  相关； $F_f$ 、 $f_0$  与螺旋叶片、土壤的材料特性有关。将土壤颗粒合力  $F$  分解成轴向、周向分力为

$$\begin{cases} F_z = F \cos(\varphi + \delta) \\ F_t = F \sin(\varphi + \delta) \end{cases} \quad (10)$$

式中  $\varphi$ ——土壤与螺旋叶片间摩擦角，( $^\circ$ )

$F_z$ 、 $F_t$ ——轴向、周向分力，N

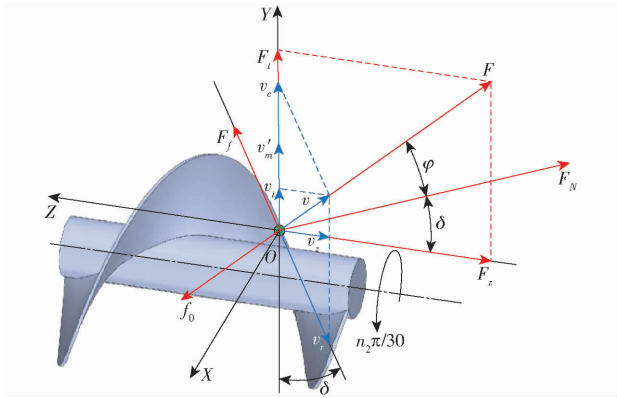


图 9 土壤颗粒在螺旋叶片作用下的受力与速度分析

Fig. 9 Force and velocity analysis of soil particles under action of spiral blade

图 9 在机组参考系下土壤颗粒沿旋转螺旋叶面合成速度  $v$  是由土壤颗粒所在螺旋叶片处的牵连速度  $v_c$  (为  $n_2 \pi r / 30$ ， $r$  为土壤颗粒至螺旋叶片轴中心线距离，其大小与  $r_0$ 、 $r_1$  有关) 与相对螺旋叶片速度  $v_r$  合成。将土壤颗粒合速度  $v$  沿轴向、周向分解，并添加机具前进速度  $v_m$  沿土壤颗粒所在螺旋叶片处的周向分量  $v'_m$  (以垂直于地面向下为  $t_0 = 0$  时刻，则  $v'_m = v_m \cos(n_2 \pi t_0 / 30)$ )，得到土壤颗粒在轴向、周向的绝对分速度为

$$\begin{cases} v_z = \frac{n_2 \pi r \sin \delta}{30 \cos \varphi} \cos(\delta + \varphi) \\ v_t = \frac{n_2 \pi r \sin \delta}{30 \cos \varphi} \sin(\delta + \varphi) + v'_m \end{cases} \quad (11)$$

式中  $v_z$ 、 $v_t$ ——轴向、周向绝对分速度, m/s

在螺旋叶片材料与土壤物理参数一定的前提下,由式(9)~(11)可知分力、分速度与螺旋叶片的 $r_1$ 、 $s$ 、 $n_2$ 参数相关。其中耕抛刀辊将部分表土抛至螺旋叶片后方,螺旋叶片大端不易入土过深,若终止螺旋极径 $r_1$ 过大则靠近厢沟的螺旋叶片挤压土壤回落厢沟内,增加开沟刀盘功耗,同时沟壁易坍塌,设终止螺旋叶片在地表下10 cm以内,此时 $r_1$ 取值范围为 $67\text{ mm} \leq r_1 \leq 167\text{ mm}$ ;若使土壤沿轴向运动,其条件为 $\delta \leq 90^\circ - \varphi$ ,因螺旋叶片各点处的螺旋升角不同,只需螺旋叶片与其刀轴相交的点满足上述条件即可,即 $r_0$ 取35 mm(螺旋叶片刀轴为常用 $\phi 70\text{ mm}$ 钢管),结合式(9)得到, $s \leq 439.82\text{ mm}$ ,为避免塞土, $s$ 大于等于2倍碎土率要求的土块最大边长,圆整后 $80\text{ mm} \leq s \leq 440\text{ mm}$ ;土壤所受法向推力 $F_N$ 随螺旋叶片转速 $n_2$ 增大而增加,当达到一定值后,土壤抛向螺旋叶片前方,重复输送,增加机具功耗,而螺旋叶片转速 $n_2$ 过小则土壤不能有效向轴向移动,影响种床平整度,降低播种深度稳定性,参考螺旋输送机<sup>[20]</sup>,取 $20\text{ r/min} \leq n_2 \leq 190\text{ r/min}$ 。综上,确定 $r_1$ 、 $s$ 、 $n_2$ 为因素对螺旋平整部件进行优化设计。

### 3 离散元仿真

#### 3.1 试验设计与测量方法

为确定螺旋平整部件较合理的结构参数与运动参数,选取终止螺旋极径 $r_1$ 、螺距 $s$ 、螺旋叶片转速 $n_2$ 为因素,以播种深度合格率 $\eta_m$ 、播种深度稳定性系数 $U_m$ 为评价指标,进行中心组合回归仿真试验。结合2.2.2节试验因素取值分析,设置试验因素编码如表1所示。

| 表 1 试验因素编码                            |                           |                  |                                                  |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------------------------------|
| Tab. 1 Experimental factors and codes |                           |                  |                                                  |
| 编码                                    | 因素                        |                  |                                                  |
|                                       | 终止螺旋极径<br>$r_1/\text{mm}$ | 螺距 $s/\text{mm}$ | 螺旋叶片转速<br>$n_2/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ |
| -1.682                                | 67                        | 80               | 20                                               |
| -1                                    | 87                        | 153              | 54                                               |
| 0                                     | 117                       | 260              | 105                                              |
| 1                                     | 147                       | 367              | 156                                              |
| 1.682                                 | 167                       | 440              | 190                                              |

整机以中心面左、右对称,并受到计算机仿真运行时间与存储空间的限制,仿真模型去除传动部件、悬挂装置、种箱、肥箱,且仅运行机具右半部。经实际测定,未耕区经表土盖种装置与沟土匀摊装置作业后,土壤孔隙增加,镇压装置压实后土壤高度比原

位高2 cm左右,为此设置仿真时镇压辊抬高至地表线2 cm处;耕抛刀辊转速 $n_1$ 由每组仿真终止螺旋极径 $r_1$ 与2.1.2节分析求得;整机作业速度 $v_m$ 由耕抛刀辊转速 $n_1$ 与斜切刀切土节距 $l_{p_1p_2}$ 求得。结合已有研究,模型参数与接触模型参照文献[21~24]选取,建立如图10a所示的机具-麦种-土壤仿真模型。

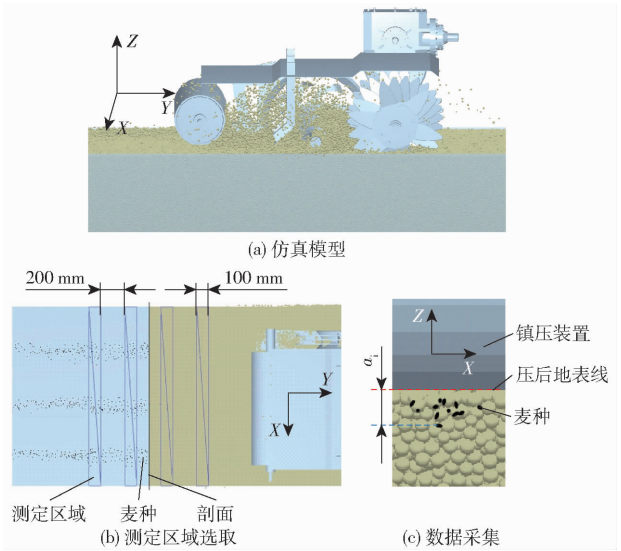


图 10 仿真模型及指标测定  
Fig. 10 Simulation model and index measurement

评价指标测定方法为:沿机具作业稳定段(机身完全处于土槽内)取4个测区,如图10b所示,每个测区厚度为100 mm,测区间距200 mm。如图10c所示,利用 EDEM 软件 Setup Selections 模块提取每个测区内所有小麦种子 $X-Z$ 轴坐标值,测定镇压后种子至地表距离 $a_i$ 。种子深度为 $(2 \pm 1)\text{ cm}$ 内为合格,计算得到每个测区播种深度合格率 $\eta$ 与播种深度稳定性系数 $U^{[25]}$ 。

求得4个测区播种深度合格率平均值 $\eta_m$ 表示播种深度合格率;播种深度稳定性系数平均值 $U_m$ 表示播种深度稳定性。

#### 3.2 仿真结果与分析

中心组合回归仿真试验测定结果如表2所示, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 为因素编码值。利用 Design-Expert 8.0.6 分析软件对试验结果进行处理,分析终止螺旋极径 $X_1$ 、螺距 $X_2$ 、螺旋叶片转速 $X_3$ 对播种深度合格率 $\eta_m$ 、播种深度稳定性系数 $U_m$ 影响显著性。

运用 Design-Expert 8.0.6 软件对表2测定结果进行多元回归拟合分析,可得播种深度合格率 $\eta_m$ 和播种深度稳定性系数 $U_m$ 模型均为 $P < 0.01$ ;回归模型失拟项均为 $P > 0.05$ ,说明回归模型显著,试验拟合程度高。剔除不显著项得出播种深度合格率 $\eta_m$ 与播种深度稳定性系数 $U_m$ 回归方程为

表 2 测定方案与结果  
Tab.2 Protocols and results

| 序号 | 因素     |        |        | 播种深度<br>合格率 | 播种深度<br>稳定性系<br>数 $U_m/\%$ |
|----|--------|--------|--------|-------------|----------------------------|
|    | $X_1$  | $X_2$  | $X_3$  | $\eta_m/\%$ |                            |
| 1  | -1     | -1     | -1     | 86.79       | 68.81                      |
| 2  | 1      | -1     | -1     | 78.71       | 73.07                      |
| 3  | -1     | 1      | -1     | 73.67       | 66.54                      |
| 4  | 1      | 1      | -1     | 60.75       | 62.89                      |
| 5  | -1     | -1     | 1      | 77.87       | 69.13                      |
| 6  | 1      | -1     | 1      | 74.27       | 78.44                      |
| 7  | -1     | 1      | 1      | 73.11       | 70.95                      |
| 8  | 1      | 1      | 1      | 64.67       | 74.36                      |
| 9  | -1.682 | 0      | 0      | 79.55       | 65.80                      |
| 10 | 1.682  | 0      | 0      | 65.66       | 70.55                      |
| 11 | 0      | -1.682 | 0      | 87.37       | 81.98                      |
| 12 | 0      | 1.682  | 0      | 65.26       | 70.22                      |
| 13 | 0      | 0      | -1.682 | 78.25       | 67.40                      |
| 14 | 0      | 0      | 1.682  | 74.04       | 75.62                      |
| 15 | 0      | 0      | 0      | 85.93       | 78.99                      |
| 16 | 0      | 0      | 0      | 85.99       | 79.33                      |
| 17 | 0      | 0      | 0      | 86.33       | 77.61                      |
| 18 | 0      | 0      | 0      | 84.61       | 75.84                      |
| 19 | 0      | 0      | 0      | 83.04       | 76.65                      |
| 20 | 0      | 0      | 0      | 86.05       | 79.56                      |

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_m &= 85.35 - 4.13X_1 - 6.05X_2 - 1.25X_3 - \\ &\quad 1.21X_1X_2 + 1.12X_1X_3 + 2.09X_2X_3 - \\ &\quad 4.64X_1^2 - 3.33X_2^2 - 3.39X_3^2 \\ U_m &= 78.03 + 1.56X_1 - 2.53X_2 + 2.59X_3 - \\ &\quad 1.73X_1X_2 + 1.51X_1X_3 + 1.27X_2X_3 - \\ &\quad 3.69X_1^2 - 2.51X_3^2 \end{aligned} \right.$$

(12)

为直观分析各因素与评价指标间的关系,通过 Design-Expert 8.0.6 分析软件绘制响应曲面,如图 11 所示。图 11a 中,螺旋叶片转速处于中心水平,当固定终止螺旋极径时,随着螺距增加,播种深度合格率先升后降;当固定螺距时,随着终止螺旋极径增加,播种深度合格率同样先升后降。如图 11b 所示,固定螺距,当终止螺旋极径一定时,播种深度合格率随着螺旋叶片转速增加呈先增后减趋势;当螺旋叶片转速一定时,播种深度合格率同样随着终止螺旋极径增加呈先增后减趋势。如图 11c 所示,固定终止螺旋极径,当螺距一定时,随着螺旋叶片转速增加,播种深度合格率先升后降;当螺旋叶片转速一定时,随着螺距增加,播种深度合格率同样呈先升后降趋势。分析其原因为,螺距与螺旋叶片转速影响沟土轴向匀摊效果,过大时机具外侧土壤堆积过多,过小时沟土来不及轴向流动,机具中部堆积,经镇压后影

响播种深度合格率;终止螺旋极径影响表土盖种性能,在中间值附近时,保证在耕抛刀辊作用下土壤能越过螺旋平整部件,覆盖在种带上,使种子能满足播种深度,不致过深或过浅。

如图 11d 所示,固定螺旋叶片转速,当终止螺旋极径在 67 ~ 117 mm 时,随着螺距增加,播种深度稳定性系数先升后降,但终止螺旋极径大于 117 mm 时,随着螺距增加土壤向机具两侧运移过多,播种深度稳定性系数降低;当终止螺旋极径一定时,播种深度稳定性系数随着终止螺旋极径增加呈现先升后降。如图 11e 所示,固定螺距,当终止螺旋极径一定时,随着螺旋叶片转速增加,播种深度稳定性系数呈先增后减趋势;当螺旋叶片转速一定时,播种深度稳定性系数随着终止螺旋极径增加同样呈先增后减,两种情况播种深度稳定性系数变化趋势基本与播种深度合格率相同。如图 11f 所示,固定终止螺旋极径,当螺距一定时,随着螺旋叶片转速增加,播种深度稳定性系数先升后降;当螺旋叶片转速大于 88 r/min 时,随着螺距增加,播种深度稳定性系数先升后降,当螺旋叶片转速小于 88 r/min 时,厢沟土壤在开沟刀盘的作用下向前抛送的距离不够,土壤回落沟内,随着螺距增加轴向运土量又增大,播种深度合格率与播种深度稳定性系数下降。

利用 Design-Expert 8.0.6 分析软件优化模块,对式(12)回归方程进行有约束多目标优化求解,求得较高的播种深度合格率与播种深度稳定性系数。设置因素约束条件为:终止螺旋极径 67 ~ 167 mm、螺距 80 ~ 440 mm、螺旋叶片转速 20 ~ 190 r/min;设置评价指标权重:播种深度合格率为“++++”,播种深度稳定性系数为“+++++”。求解非线性规划优化模型得出:当终止螺旋极径为 119.12 mm、螺距为 139.34 mm、螺旋叶片转速为 97.82 r/min 时,求得最优播种深度合格率为 88.15%、播种深度稳定性系数为 79.75%。因加工精度影响,圆整后取终止螺旋极径为 119 mm、螺距为 140 mm、螺旋叶片转速为 98 r/min,经计算耕抛刀辊转速为 320 r/min。对上述因素组合重新进行仿真模型验证,得到播种深度合格率为 86.38%、播种深度稳定性系数为 78.84%,基本与理论结果一致,说明回归方程准确。

## 4 田间试验

### 4.1 试验条件

在上述分析与仿真优化结果的前提下,对土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机加工试制,并于 2020 年 11 月在湖北省农业科学院粮食作物研究所试验

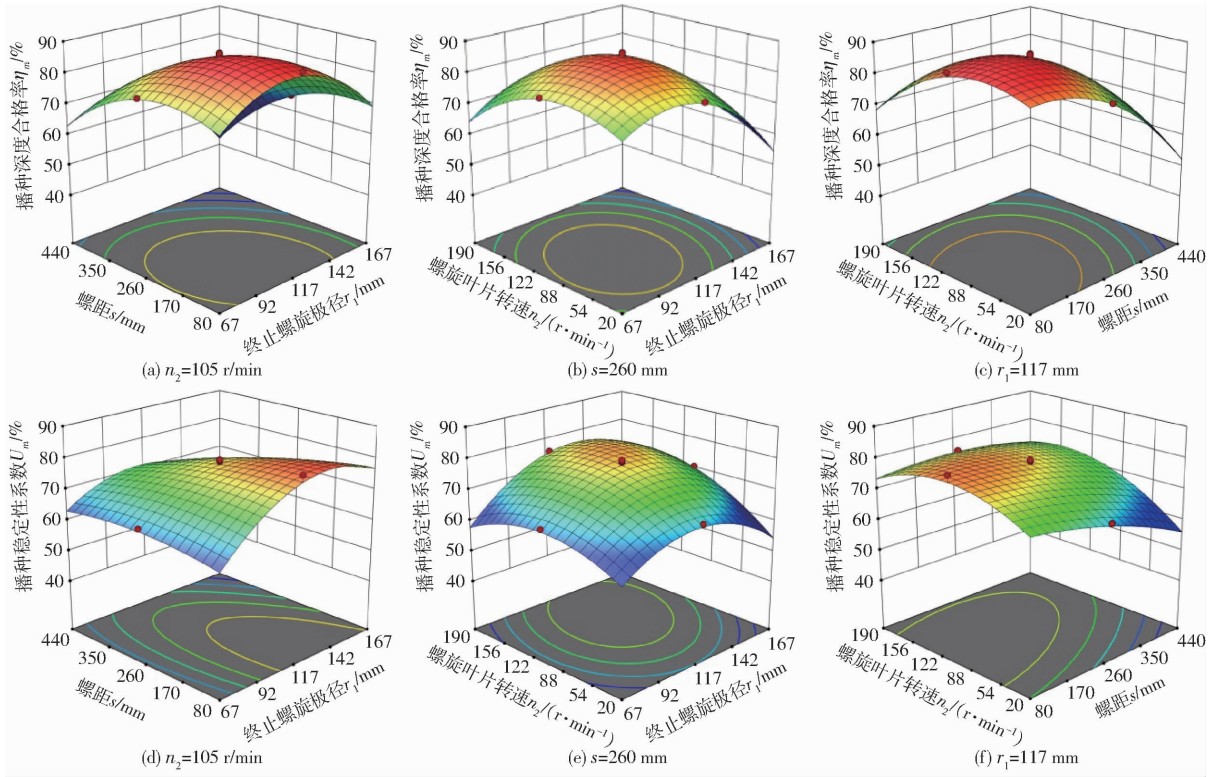


图 11 各因素对评价指标影响的响应曲面

Fig. 11 Responding surfaces of experimental factors on working performance

地(114°18'E、30°29'N)进行田间试验。试验区采用稻茬离田和稻茬还田两种模式,试验现场如图 12 所示。试验地土壤类型为水稻土,作业前地表平整度为 8.68 mm,深度 0 ~ 25 cm 土壤紧实度均值 789.85 kPa,土壤容重均值 1.37 g/cm<sup>3</sup>,土壤含水率均值 36.45%;稻茬离田模式下,人工处理稻茬和秸秆,留少量碎秆,秸秆覆盖率均值 11.25 g/cm<sup>2</sup>;稻茬还田模式下,秸秆长度小于 35 cm,覆盖量均值 921.34 g/m<sup>2</sup>;选用鄂麦 28 号小麦种子,播量调节为 300 kg/hm<sup>2</sup>。试验仪器设备主要包括土壤分流式宽苗带小麦少耕播种试验样机、东方红 LX904 型拖拉机、数显土壤紧实度仪、电热恒温鼓风干燥箱、环刀、电子秤、钢尺、卷尺等。



图 12 田间试验

Fig. 12 Field experiment

4.2 测试指标与试验方法

选择地势平坦地块作为测试区,划分 6 个行程,每种模式测定 3 个行程,中间 60 m 作为实际测定区域。测试指标包括:播种深度合格率、播种深度稳定性系数、厢沟质量(厢面沟宽、厢面沟宽稳定性系数、厢沟深度、厢沟深度稳定性系数)、滑移率、机具通过性,其中播种深度合格率与稳定性测定每个行程等间距(2 m)选取 10 个测点,测定方法与 3.1 节相同,其余指标测定方法如下。

4.2.1 厢沟质量

机具作业后,同一模式下在不同行程内,以 5 m 为间距共选取 5 个点作为测定点。去除沟内浮土与秸秆,采用钢尺和水平仪,测定厢沟宽度与厢沟深度。每种模式重复测定 3 次,分别计算各指标的平均值、变异系数与稳定性系数。

4.2.2 滑移率

机具排种器由镇压辊与地表产生的滚动驱动,测定镇压辊滑移率方法为,用黄色胶带粘结在镇压辊轴向,测定播种机作业过程中,镇压轮转动 20 圈时,机具前进距离  $S_t$ ,滑移率  $H_r$  计算式为

$$H_r = \frac{S_t - 20\pi D_g}{20\pi D_g} \times 100\% \tag{13}$$

式中  $D_g$ ——镇压辊直径,取 320 mm  
每种行程测定 1 次,求均值。

4.2.3 机具通过性

参考 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》方法,测定稻茬还田模式下机具通过性,测定长度为 60 m,观察播种作业过程,机具被稻茬、秸秆缠绕堵塞情况。

4.3 试验结果与分析

稻茬离田和稻茬还田两种模式下,土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机作业后播种深度合格率、播种深度稳定性系数、厢沟质量、滑移率测定结果如表 3 所示。

表 3 田间试验测定结果

Tab.3 Field tests measurement results

| 测定指标        | 作业模式       |            |
|-------------|------------|------------|
|             | 稻茬离田       | 稻茬还田       |
| 播种深度合格率/%   | 83.12      | 80.67      |
| 播种深度稳定性系数/% | 74.78      | 72.25      |
| 厢面沟宽/cm     | 18.49±1.44 | 19.26±1.58 |
| 厢面沟宽稳定性系数/% | 84.72      | 83.66      |
| 厢沟深度/cm     | 24.65±1.38 | 24.81±1.29 |
| 厢沟深度稳定性系数/% | 86.34      | 84.22      |
| 滑移率/%       | 6.86       | 7.56       |

4.3.1 播种深度合格率与稳定性系数分析

由表 3 可知,稻茬离田模式下播种深度合格率与稳定性系数分别为 83.12%、74.78%,高于稻茬还田模式下播种深度合格率(80.67%)与稳定性系数(72.25%),但低于仿真优化结果,分析其原因:①与仿真相比,机具作业后土块体积相对不均匀,覆盖种子后降低了播种深度合格率与其稳定性;田间机具作业前因联合收获机和拖拉机碾压,地表平整度低于仿真土壤模型地表(2.33 mm);田间试验中,随着深度与地势的变化土壤含水率分布不均匀,沟底抛出的土壤含水率较高,靠近厢沟两侧土壤镇压辊出现少量粘附,影响了对应种带的播种深度与其稳定性;总体而言,仿真优化结果与田间试验基本一致。②与稻茬还田模式相比,地表有秸秆和稻茬时,机具作业到一定距离,斜切刀刀尖位置会缠挂少量秸秆,增加了抛土量,降低了播种深度合格率;稻茬根部粘附部分土壤,加上秸秆分布不均匀,斜切刀与螺旋叶片对其作用时,影响表土覆盖与沟土匀摊效果,降低了播种深度稳定性系数。综合以上分析,两种作业模式下,均实现了表土盖种、沟土匀摊目的,机具播种深度合格率与稳定性均达到 GB/T 20865—2007《免耕施肥播种机》与 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》等标准要求。

4.3.2 厢沟质量分析

由表 3 可知,两种模式下厢面沟宽均值分别为 18.49、19.26 cm,均大于设计值 17.5 cm,观测机具作业过程可知,机具作业后沟壁靠近表土位置,有少部分土壤滑落,增加了厢面沟宽;去除浮土后的厢沟深度分别为 24.65、24.81 cm,基本达到设计值 25 cm;两种模式下厢面沟宽稳定性系数与厢沟深度稳定性系数,均满足 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》要求的大于等于 80%。田间试验表明,机具作业后的厢沟质量满足长江中下游农业区小麦种植农艺要求。

4.3.3 滑移率与通过性分析

经计算,镇压辊转动 20 圈理论距离为 20.11 m,两种模式实际作业距离均值分别为 21.49、21.63 m,计算得到滑移率分别为 6.86%、7.56%。稻茬还田模式下,通过观察在 60 m 作业距离中,耕抛刀辊并未出现稻茬、秸秆缠绕堵塞情况,只在机具侧板出现缠挂秸秆现象,但随着机具前进,秸秆掉落,不影响整机作业质量。试验表明机具滑移率与通过性良好。

5 结论

- (1)结合宽苗带小麦播种农艺要求与长江中下游农业区小麦少耕种植技术特点,设计了一种土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机,一次作业可实现表土均匀盖种、沟土均匀平摊、镇压等工序,提高了宽苗带小麦少耕播种播种深度合格率与稳定性,利于后续小麦生长。
- (2)对表土盖种装置与沟土匀摊装置进行了结构设计,并通过理论分析,确定影响播种深度与稳定性关键因素为终止螺旋极径、螺距、螺旋叶片转速。通过中心组合正交试验和离散元仿真得出较优参数组合为:终止螺旋极径 119 mm、螺距 140 mm、螺旋叶片转速 98 r/min,此时,播种深度合格率为 86.38%、播种深度稳定性系数为 78.84%。
- (3)采用稻茬离田与稻茬还田两种模式进行田间试验表明:稻茬离田模式下播种深度合格率与稳定性系数分别为 83.12%、74.78%,与仿真优化结果基本一致;稻茬还田模式下播种深度合格率与稳定性系数分别为 80.67%、72.25%,两模式下均满足小麦少耕播种农艺要求;两模式开沟质量、滑移率良好;在覆盖地未出现稻茬、秸秆缠绕堵塞现象。整机作业效果满足了长江中下游农业区宽苗带小麦少耕播种需求。

参 考 文 献

[1] 罗海平,邹楠,胡学英,等. 1980—2019 年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J]. 资源科

- 学,2021,43(6): 1234-1247.
- LUO Haiping, ZOU Nan, HU Xueying, et al. Climatic potential productivity and resources utilization efficiency of major grain crops in the main grain production areas of China, 1980—2019[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1234-1247. (in Chinese)
- [2] 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 precision seeding for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese)
- [3] 石玉华,初金鹏,尹立俊,等. 宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J]. 农业工程学报,2018,34(17): 127-133.
- SHI Yuhua, CHU Jinpeng, YIN Lijun, et al. Wide-range sowing improving yield and nitrogen use efficiency of wheat sown at different dates[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 127-133. (in Chinese)
- [4] 孔令英,赵俊晔,于振文,等. 宽幅播种条件下种植密度对小麦群体结构和光能利用率的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(7): 850-856.
- KONG Lingying, ZHAO Junye, YU Zhenwen, et al. Effect of planting density on population structure and light use efficiency of wheat under wide-width sowing conditions[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(7): 850-856. (in Chinese)
- [5] LI Quanqi, BIAN Chengyue, LIU Xinhui, et al. Winter wheat grain yield and water use efficiency in wide-precision planting pattern under deficit irrigation in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2015, 153: 71-76.
- [6] LIU Xin, WANG Wenxin, LIN Xiang, et al. The effects of intraspecific competition and light transmission within the canopy on wheat yield in a wide-precision planting pattern[J]. Agricultural Water Management, 2020, 19(6): 1577-1585.
- [7] 胡红,李洪文,李传友,等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(4): 24-32.
- HU Hong, LI Hongwen, LI Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat planter in rice stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 24-32. (in Chinese)
- [8] 姜萌,刘彩玲,魏丹,等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(11): 53-62.
- JIANG Meng, LIU Cailing, WEI Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53-62. (in Chinese)
- [9] XI Xiaobo, GU Chenjia, SHI Yangjie, et al. Design and experiment of no-tube seeder for wheat sowing[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104724.
- [10] SHI Yinyan, XIN Sun, WANG Xiaochan, et al. Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105021.
- [11] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. 农业工程学报,2019,35(1): 1-11.
- ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 1-11. (in Chinese)
- [12] 刘俊孝,王庆杰,李洪文,等. 针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J]. 农业工程学报,2019,35(11): 10-18.
- LIU Junxiao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and seed suction performance of pinhole-tube wheat precision seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 10-18. (in Chinese)
- [13] XU Xingrui, GENG Duanyang, WANG Qian, et al. Design and experiment of pneumatic conveying seeder with no-tillage for simultaneous seeding of wheat seed and fertilizer[C] // American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2019 ASABE Annual International Meeting, 2021,9(5):845.
- [14] 程顺和,郭文善,王龙俊. 中国南方小麦[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2012.
- [15] ZHENG Kan, CHENG Jian, XU Lei, et al. Reducing soil adhesion and straw anti-wrapping rotary straw crushing device in paddy field[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2020, 29(3): 1-11.
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [17] 郑侃,李宇飞,夏俊芳,等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向往复刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5): 88-98.
- ZHENG Kan, LI Yufei, XIA Junfang, et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 88-98. (in Chinese)
- [18] 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等. 耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J]. 农业工程学报,2011,27(4): 111-116.
- JIA Honglei, HUANG Dongyan, LIU Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 111-116. (in Chinese)
- [19] 牛琪,王庆杰,陈黎卿,等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11): 52-59.
- NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52-59. (in Chinese)
- [20] 《运输机械设计选用手册》编辑委员会. 运输机械设计选用手册(上册)[M]. 北京:化工工业出版社,1999.
- [21] CHEN Jian, ZHENG Kan, XIA Junfang, et al. Analysis of adhesion between wet clay soil and rotary tillage part in paddy field based on discrete element method[J]. Processes, 2021, 9(5): 845.
- [22] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报,2020,51(10): 42-50.
- ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42-50. (in Chinese)
- [23] SUN Jianfeng, CHEN Huaming, WANG Zaiman, et al. Study on plowing performance of EDEM low-resistance animal bionic device based on red soil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104336.
- [24] 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报,2016,32(12): 247-253.
- LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247-253. (in Chinese)
- [25] 高原源,王秀,杨硕,等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(7): 19-29.
- GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 19-29. (in Chinese)