

油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置设计与试验

廖宜涛^{1,2} 武安阳¹ 秦永豪¹ 廖庆喜^{1,2} 欧耀徽¹ 张青松^{1,2} 李运通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: 针对现有稻田轮作区油菜精量联合直播种床整理采用旋耕拖板平整厢面、牵引式开畦沟犁组开设畦沟, 易出现厢面不平、沟形不稳等问题, 提出了旋耕起垄埋茬、封闭型开畦沟、主动式旋压整形、仿形开种沟油菜精量联合直播凸垄种床构建工艺, 设计了一种油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置, 由开畦沟犁、旋耕起垄刀组配合变轴颈整形辊与仿形机构组成, 实现畦沟与厢面旋压整形, 构建凸状垄面, 并通过与整形辊一体式开种沟圆环进行种沟开设, 实现油菜直播播深仿形控制。依据油菜种植畦沟开设要求, 设计了由不同型体曲面构成的组合式封闭型开畦沟犁组, 结合提出的垄面构建工艺以及土壤运移规律, 进行了变轴颈整形辊结构设计、力学分析和镇压力控制机构设计; 通过离散元仿真开展了正交试验, 进行了响应曲面分析, 以厢面倾角 α 稳定和沟墙倾角 β 最大为目标, 优化得到较优工作参数为: 装置前进速度 3.8 km/h、旋耕刀转速 280 r/min、整形辊转速 147 r/min。田间试验结果表明, 装置作业后凸垄厢面轮廓及畦沟沟形稳定, 仿形部件镇压力控制效果较好, 厢面倾角为 2.94°, 沟墙倾角为 49.09°, 倾角稳定性系数均大于 90%, 厢面平整度为 12.31 mm, 土壤坚实度稳定性系数为 91.77%, 沟深及沟宽稳定性系数均大于 90%, 条形种沟明显, 出苗效果良好; 通过跟踪油菜生育周期内畦沟沟形演变情况, 发现经过整个冬春油菜生育期, 平均畦沟深度减小 31.68%, 平均上沟宽度增大 21.65%, 未出现沟墙坍塌现象; 装置畦沟开设质量、厢面整形质量、镇压力控制效果和播深控制效果均满足油菜种植要求。

关键词: 油菜直播; 凸垄厢面; 种床制备; 播深控制; 仿形机构

中图分类号: S223.2⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0121-13

OSID:



Design and Experiment of Convex Ridge Surface Shaping Device for Rapeseed Direct Seeding

LIAO Yitao^{1,2} WU Anyang¹ QIN Yonghao¹ LIAO Qingxi^{1,2} OU Yaohui¹ ZHANG Qingsong^{1,2} LI Yuntong¹

(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: In response to the challenges encountered in the existing rice-rapeseed rotation area during the precision combined direct seeding bed preparation for rapeseed, which involves using rotary tillage drag plates to level the bed surface and a traction-type furrow opener plow to create furrows, issues such as uneven bed surface and unstable furrow patterns are prone to occur. To address these concerns, a construction process for a precision combined direct seeding bed with convex ridge surface for rapeseed was proposed. It involved rotary tillage for ridge formation and residue burial, enclosed furrow opening, active rotary compaction and shaping, and controlled furrow opening for precision seeding. To achieve this, a specialized device was designed, comprising a furrow opening plow, a rotary tillage and ridging knife assembly, a shaping mechanism, and a variable neck shaping roller. This integrated system enabled the formation and compaction of ridges and furrows, leading to convex-shaped planting beds. Furthermore, the system incorporated a circular furrow opener to create furrows while simultaneously ensuring controlled seeding depth. Following the requirements for furrow opening in rapeseed cultivation, a combination of furrow-opening plow units with distinct curved surfaces was designed. Taking into

收稿日期: 2024-01-02 修回日期: 2024-02-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)、国家自然科学基金项目(32001427)、国家现代油菜产业技术体系项目(CARS-12)和湖北省农机装备攻关项目(HBSNY202207)

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,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: liaotao@mail.hzau.edu.cn

account the proposed bed construction process and soil movement patterns, the structural design of the variable neck shaping roller, the mechanical analysis, and the pressure control mechanism were performed. Orthogonal experiments were conducted through EDEM simulation, and response surface analysis was performed. The stable box surface angle α and the maximum furrow wall angle β were set as objectives. The optimal working parameters obtained were as follows: device forward speed was 3.8 km/h, rotary tillage blade speed was 280 r/min, and shaping roller speed was 147 r/min. Field test results indicated that the device achieved stable ridge surface profiles and furrow shapes post-operation. The profiling component demonstrated effective pressure control, achieving a ridge surface inclination angle of 2.94° and a furrow wall inclination angle of 49.09° , with inclination stability coefficients exceeding 90%. The ridge surface evenness was 12.31 mm, and the soil firmness stability coefficient was 91.77%. Both furrow depth and width stability coefficient exceeded 90%, with clear furrowed seed grooves and satisfactory seedling emergence. Tracking the furrow shape evolution throughout the rapeseed growth cycle revealed that during the winter and spring growth periods, the average furrow depth was decreased by 31.68%, and the average furrow width was increased by 21.65%, with no furrow wall collapse observed. The device's quality of furrow formation, ridge surface shaping, pressure control, and planting depth control all met the requirements for rapeseed cultivation. The research result can provide valuable reference for the improvement and design enhancement of precision combined direct-seeding machines for rapeseed cultivation.

Key words: rapeseed direct seeding; convex ridge surface; seedbed preparation; seeding depth control; profiling mechanism

0 引言

长江中下游地区是我国冬油菜主产区,种植模式以稻油轮作为主。受该区域地下水位高、冬春季节雨水多和油菜防渍害等要求,农艺上采用开沟起垄、分厢播种,主要工序包括灭茬、旋耕、开厢沟等种床整理和播种、施肥作业;主推技术为油菜精量联合直播,即前茬水稻收获后应用油菜精量联合直播机一次完成上述所有工序,省种省工,节本增效^[1-5]。

油菜直播种床质量是影响油菜发芽、成苗及生产发育的关键。油菜为忌水作物,油菜直播种床构建需要防渍控水,避免因土壤过湿或积水而发生渍害,降低成苗率、影响根系吸肥能力和植株生长发育^[6-7]。为此,包攀峰等^[5]提出了深沟窄垄的油菜直播种床整理工艺,并开发了配套油菜精量联合直播机;张青松等^[8-9]运用铧式犁相关原理优化设计了开畦沟装置,使得畦沟残留土壤减少,提升了种床整理开沟质量;刘晓鹏等^[10-11]运用微分几何理论设计了一种适用于黏重土壤条件的组合式船形开沟器。上述研究主要采用牵引式开沟部件和平土拖板实现被动式沟壁整理和垄面平整,存在土壤粘附、自由流动等情况,易造成沟形不稳、垄面局部凹缺等问题,导致种床质量下降。

为提升种床质量,何进等^[12]采用熟地型起垄犁和圆柱形镇压辊配合作业,实现种床起垄整形。林静等^[13]设计了联合作业旋耕起垄整形机,实现了一次作业完成灭茬、深松、旋耕、起垄和镇压,主要由起垄铲和镇压辊旋压垄面和沟形。刘海等^[14]采用犁

铧开畦沟、旋耕碎土、整形弧板挤压土壤、起垄辊压实等作业方案,作业后形成驳岸型沟墙以避免沟墙因雨水冲刷而垮塌。杜文斌等^[15]依据雪茄烟叶根系分布规律设计了起垄辊,由收土圆盘收土,旋耕集土部件成垄,整形辊整形完成起垄整形作业。以上研究主要采用牵引式开沟部件开沟和起垄辊旋压整形来提升种床质量,但所构造厢面多为平面型厢面,存在沥水效果差、厢面中间渍水等问题,不适用于长江中下游地区油菜直播种床整理。

为解决现有油菜精量联合直播牵引式开沟部件开设畦沟沟形稳定性不足、平面厢面沥水效果差等问题,本文提出一种中间高、两侧低的凸垄厢面构建工艺;设计一种油菜直播机凸垄厢面构建装置,由开畦沟装置、旋耕起垄刀组、仿形机构与变轴颈整形辊组成,可一次完成旋耕灭茬、垄沟开设、厢面整形、播深控制等工序;持续跟踪油菜生育周期内畦沟沟形演变情况,以验证凸垄厢面构建的可行性。

1 整体结构与工作过程

1.1 整体结构组成

油菜直播机凸垄厢面构建装置主要由开畦沟装置、旋耕起垄刀组、仿形机构与变轴颈整形辊组成,总体结构如图1所示。其中,开畦沟装置和变轴颈整形辊是油菜精量联合直播机构建凸垄厢面的关键部件。开畦沟装置由开畦沟前犁、开畦沟后犁和侧边挡土板组成,两犁沿前进方向依次布置;变轴颈整形辊装有一体式开种沟圆环,通过挂接板与机架相

连;仿形机构装于挂接板与开畦沟后犁犁柱上,以实现对变轴颈整形辊的仿形控制。整机主要技术参数如表 1 所示。

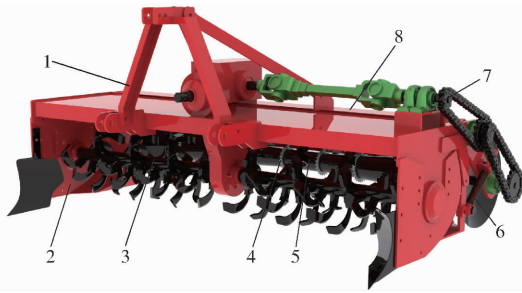


图 1 油菜直播机凸垄厢面构建装置结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of ridging shaping device

1. 三点悬挂装置 2. 开畦沟装置 3. 旋耕起垄刀辊 4. 开种沟圆环 5. 变轴颈整形辊 6. 仿形机构 7. 传动机构 8. 施肥铲安装架

表 1 整机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of machines

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 570×2 450×1 200
耕作幅宽/mm	2 300
旋耕深度/mm	120~190
开种沟深度/mm	25
开畦沟深度/mm	150~220
开畦沟宽度/mm	250~350
作业速度/(km·h ⁻¹)	<5.0

1.2 工作过程

装置作业时,凸垄厢面构建装置挂接在轮式拖拉机上,由拖拉机动力输出轴(PTO)提供动力,一次作业完成旋耕灭茬、畦沟开设、厢面整形、播深控制等功能,构建中间高、两侧低的凸垄厢面,如图 2 所示。作业时,封闭型开畦沟犁组进行破土作业切出土垡,将畦沟土壤翻覆于旋耕起垄刀组工作区,并防止旋耕过程中土壤越过犁组破坏畦沟沟形,初步构建畦沟沟墙;旋耕起垄刀组进行土壤破碎、秸秆埋

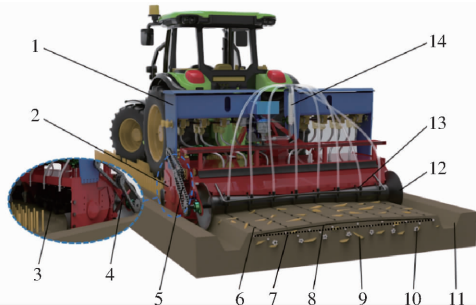


图 2 农艺实现过程及配套装置

Fig. 2 Agronomic realization process and supporting devices

1. 肥箱 2. 开畦沟装置 3. 旋耕灭茬部件 4. 仿形机构 5. 传动机构 6. 油菜种子 7. 普通厢面轮廓 8. 凸垄厢面轮廓 9. 秸秆 10. 肥料 11. 畦沟 12. 整形部件 13. 开种沟圆环 14. 气送式集排器

覆,初步构建厢面;变轴颈整形辊结合仿形装置通过主动旋压对厢面和畦沟沟墙进行二次整形,以构建凸垄厢面和畦沟沟墙,并通过与整形辊一体式开种沟圆环进行种沟开设,实现油菜直播播深仿形控制;排种器排出的种子落入到种沟内,实现油菜精量联合直播作业。

2 关键部件设计

2.1 开畦沟装置

开畦沟装置是凸垄厢面构建的关键装置,其结构如图 3 所示,由开畦沟前犁、开畦沟后犁和侧边挡土板组成。后犁与侧边挡土板固连为一体,前犁通过螺栓与之连接,侧边挡土板通过螺栓与旋耕机侧板相连接,进而形成封闭型开畦沟装置。通过两犁对土垡进行切、抬、翻、扣,结合侧边挡土板和旋耕起垄刀组,实现畦沟开设和沟墙初步构建,为变轴颈整形辊二次整形打好基础。

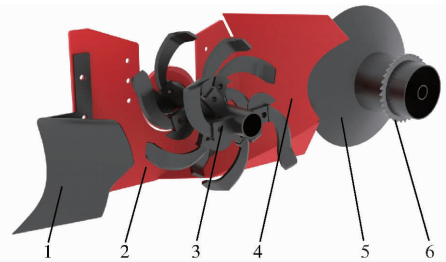


图 3 开畦沟装置结构示意图

Fig. 3 Schematic of furrow opening components

1. 开畦沟前犁 2. 侧边挡土板 3. 旋耕起垄刀辊 4. 开畦沟后犁 5. 变轴颈整形辊 6. 开种沟圆环

2.1.1 开畦沟前犁

开畦沟前犁主要作用为破土开沟,将土壤内收至旋耕刀作业范围,同时兼备碎土能力,因而选用熟地型犁体曲面。为减小犁体尺寸,降低作业阻力,犁体横向尺寸相较标准犁体较小,胸部较陡,翼部内扣。犁体曲面是由水平直线沿导曲线按照元线角变化规律进行旋转运动所产生的轨迹形成^[16-18],为构建理想犁体曲面,需对导曲线和元线角变化规律进行设计。

针对预试验过程中在黏重土壤和较为干燥的坚硬地块作业时,常有土垡越过犁体破坏沟形的情况,进行了曲面轮廓改进和犁体加高。将开畦沟前犁耕宽设计为 130 mm,最大耕深设计为 270 mm,并将导曲线改为由直线段和两段圆弧构建而成,直线段与弧线、弧线段与弧线段连接处均为相切关系,其结构如图 4b 所示。取前犁导曲线各段端点坐标为 $A(0,0)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 、 $C(x_C, y_C)$ 、 $D(x_D, y_D)$,导曲线高度 H_q 取 350 mm,圆心坐标依次为 (a, b) 、 (c, d) ,则导曲线的参数方程可表示为

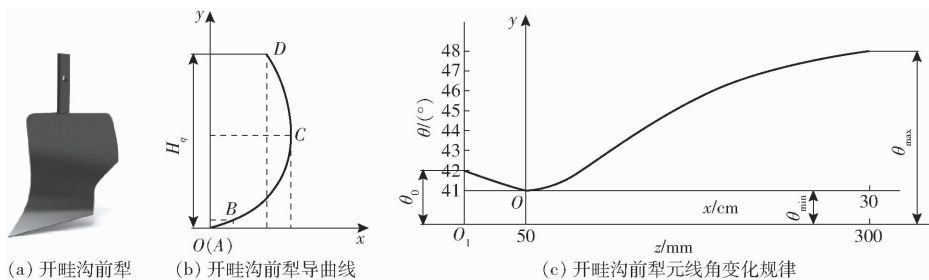


图4 开畦沟前犁犁体导曲线与元线角变化规律

Fig. 4 Variation patterns of plow body guiding curves and rake angle prior to furrow opening

$$f(y) = \begin{cases} \frac{y}{k} & (0 \leq y < y_B) \\ \sqrt{R_1^2 - (y-b)^2} + a & (y_B \leq y < y_C) \\ \sqrt{R_2^2 - (y-d)^2} + c & (y_C \leq y < y_D) \end{cases} \quad (1)$$

式中 k ——直线段直线斜率

R_1 —— BC 段圆弧半径, mm

R_2 —— CD 段圆弧半径, mm

根据几何关系可得

$$\begin{cases} \tan \varepsilon_1 = k = \frac{-(x_B - a)}{\sqrt{R_1^2 - (x_B - a)^2}} \\ \frac{-(x_C - a)}{\sqrt{R_1^2 - (x_C - a)^2}} = \frac{-(x_C - c)}{\sqrt{R_2^2 - (x_C - c)^2}} \\ x_B \tan \varepsilon_1 = \sqrt{R_1^2 - (x_B - a)^2} + b \\ \sqrt{R_1^2 - (x_C - a)^2} + b = \sqrt{R_2^2 - (x_C - c)^2} + d \end{cases} \quad (2)$$

联立方程可得

$$\begin{cases} k = \tan \varepsilon_1 \\ a = x_B - \vartheta \\ b = x_B \tan \varepsilon_1 - \sqrt{R_1^2 - \vartheta^2} \\ c = x_C - \frac{(x_C - x_B + \vartheta) R_2}{R_1} \\ d = \sqrt{R_1^2 - (x_C - x_B + \vartheta)^2} + b - \sqrt{R_2^2 - [(x_C - x_B + \vartheta) R_2 / R_1]^2} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\vartheta = \sqrt{\frac{R_1^2 \tan^2 \varepsilon_1}{1 + \tan^2 \varepsilon_1}} \quad (4)$$

在导曲线参数方程中, 直线段斜率即犁刃起土角 ε_1 取 20° , 直线段长度 S_1 取 50 mm, R_1 取 175 mm, R_2 取 300 mm, 又有

$$\begin{cases} x_B = S_1 \cos \varepsilon_1 \\ y_B = S_1 \sin \varepsilon_1 \end{cases} \quad (5)$$

联立式(3)~(5)可得, $k = 0.364$, $a = -12.87$ mm, $b = 181.55$ mm, $c = -137.76$ mm, $d = 186.81$ mm。

元线角变化规律曲线由 2 段组成, 第 1 段由直线组成, 由 $\theta_0 = 42^\circ$ 减至 $\theta_{\min} = 41^\circ$; 第 2 段曲线为抛

物线, 由 θ_{\min} 增至 $\theta_{\max} = 48^\circ$, 其变化规律由函数式表示为

$$y_1 = \frac{6.2x^2}{x^2 + 100} \quad (6)$$

2.1.2 开畦沟后犁

开畦沟后犁以翻土清沟为设计目标, 并需要兼顾与旋耕刀组和整形机构之间的配合, 同时应尽量减小整机纵向尺寸。预设畦沟内土壤经后犁作用后主要用于组成畦沟沟墙, 因此需后犁有较小的犁刃起土角, 缓慢释放土壤以形成坚实沟墙, 翼部有较强内扣作用。其犁刃处设计耕宽为 100 mm, 呈倒梯形逐步增加沟宽, 犁体高度为 500 mm, 覆盖整个旋耕机后部以防漏土。犁体设计采用水平直元线法作为基础理论, 结构偏向于半螺旋型犁, 导曲线具体参数为: 高度 H_h 为 520 mm, 开度 L_h 取 210 mm, 端点切线夹角 ω 取 65° 、犁刃起土角 ε_2 取 5° 、直线段长度 S_2 取 30 mm。开畦沟后犁导曲线依据包络线作图法可以直接得出。元线角变化规律同样由两段曲线组成, 第 1 段由直线组成, 元线角由 $\theta'_0 = 35^\circ$ 递减至 $\theta'_{\min} = 32^\circ$, 第 2 段元线角由 θ'_{\min} 增大至 $\theta'_{\max} = 47^\circ$, 其变化规律函数式为

$$y_2 = \frac{x^2}{25} \quad (7)$$

犁体导向曲线位于犁刃垂面内, 垂面与犁尖距离为犁刃长度的 $2/3$ 。导曲线和元线角变化规律如图 5 所示。

2.2 变轴颈整形辊部件

变轴颈整形辊需构建中间高、两端低的凸垄厢面, 是提升厢面质量的关键部件, 由圆柱段、变轴颈段和喇叭口段组成, 在整形辊上均布有开种沟圆环以进行油菜种沟开设。整形辊通过主动旋压对旋耕后的厢面进行 2 次整形, 构建凸垄厢面并稳定沟墙, 通过一体式开沟圆环实现油菜直播播深仿形控制, 工作示意图如图 6 所示。

2.2.1 变轴颈整形辊

整形辊采用变轴颈形式, 承接开畦沟后犁进行厢面整形和畦沟加强, 为避免因倾角过大而导

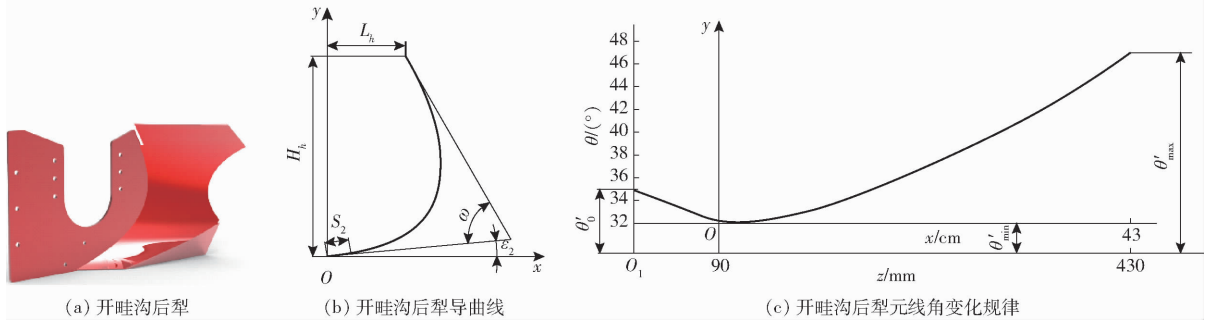


图 5 开畦沟后犁犁体导曲线与元线角变化规律

Fig. 5 Variation patterns of plow body guiding curves and rake angle after furrow opening

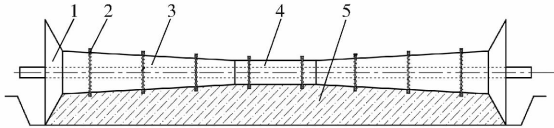


图 6 变轴颈整形辊工作示意图

Fig. 6 Variable journal shaping roller working diagram

- 1. 喇叭口段 2. 开种沟圆环 3. 变轴颈段 4. 圆柱段 5. 作业厢面

致厢面水土侵蚀加剧,整形辊锥段母线与水平线夹角设为 3° ^[19-20]。整理后厢面呈中间高、两边低凸垄形,厢面高度差为 4.5 cm,便于将多余雨水及时排出。

为实现种沟开设和播深仿形控制,在整形辊上均布开种沟单元。通过整形辊主动旋压,在厢面整形同时进行种沟开设,由于开种沟圆环相对整形辊位置固定,种沟深度不受机器挂接方式、地表起伏的影响,有效保证了播深一致性。开种沟圆环边缘加工成锯齿状,使得开出的种沟沟内土壤疏松。结合油菜播深要求,设计种沟沟形为沟深 25 mm、沟宽 15 mm 的矩形,圆环半径比变轴颈整形辊各安装轴段半径大 25 mm。整形辊曲线即为田间作业后凸垄垄体断面曲线,为便于雨水流出和加工制造,变轴颈整形辊外形曲线均由直线组成,其上均布 8 个开种沟单元以实现油菜直播作业。

基于部件作业前后土壤运移和体积变化,以及整形辊和土壤之间的相对运动,对整形辊进行结构设计和参数匹配。装置作业后土壤运移与体积变化如图 7 所示。

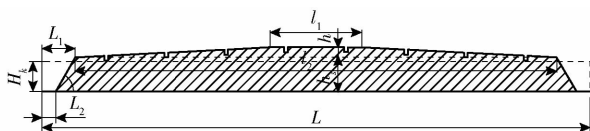


图 7 土壤运移及体积变化

Fig. 7 Soil migration and volume change

图 7 中,各参数应满足关系

$$\begin{cases} H_k L = k_t \left[(L - L_1 - L_2) h_s + \frac{1}{2} (l_2 + l_1) h \right] \\ l_2 = L - 2L_1 \\ \theta = \arctan \frac{h_s}{L_1 - L_2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 k_t ——与土壤坚实度相关系数,取 0.88^[21-22]

h ——厢面高度差,mm

h_s ——厢面垄高,mm

H_k ——作业耕深,mm

l_1 ——厢面平整段宽度,mm

l_2 ——种床宽度,mm

L ——机器作业幅宽,mm

L_1 ——畦沟上沟宽,mm

L_2 ——畦沟沟底宽,mm

θ ——畦沟沟墙倾角, ($^\circ$)

其中作业幅宽 L 为 2 300 mm,种床宽度 l_2 为 2 100 mm,起垄高度 h_s 为 190 mm,畦沟沟底宽 L_2 为 45 mm,结合旋耕起垄刀组工作深度和厢面种床倾角,在保证沟墙稳定和排水流畅的前提下沟墙应尽量陡峭,综合考虑沟墙倾角 θ 取 55° 、厢面平整段宽度 l_1 取 400 mm、畦沟上沟宽 L_1 取 178 mm。

2.2.2 整形辊转速

在装置作业过程中,凸垄厢面构建装置的前进速度、旋耕刀组转速和整形辊转速是保障装置作业效果的关键因素。整形辊作业时,转速过高会导致厢面被打磨光滑,影响土壤透气性;转速过低则会导致土壤被整形辊向前拖动,不能达到平整厢面的目的。考虑到整形辊为变轴颈形式,为提高整形辊转速设置合理性,在使用整形辊半径作为计算参数时,选取变轴颈整形辊厢面整形部分等效半径为计算参数,等效半径 \bar{r} 计算式为

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{r_1^2 l_1 + \frac{1}{3} (l_2 - l_1) (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)}{l_2}} \quad (9)$$

式中 \bar{r} ——整形辊厢面整理部分等效半径,mm

r_1 ——整形辊中间直段半径,mm

r_2 ——整形辊变轴颈段大端半径,mm

结合式(9), r_1 为57 mm, r_2 为101.5 mm,则 \bar{r} = 76.40 mm。长江中下游地区稻茬田拖拉机动力为58.84 ~ 73.55 kW,一般为中低挡作业,为使装置高速作业时整形辊不出现壅土,低速作业时不对厢面过度打磨,变轴颈整形辊转速应满足

$$n < \frac{3 \times 10^4 v_{\max}}{\pi r} \quad (10)$$

式中 v_{\max} ——机器设计最大作业速度,m/s

n ——变轴颈整形辊转速,r/min

凸垄厢面构建装置工作时前进速度小于5 km/h,由式(10)可得,整形辊理论转速应小于173.69 r/min,具体作业参数需要结合仿真试验和田间试验进一步确定。

2.2.3 整形辊受力分析

整形辊在作业过程中通过对土壤进行主动旋压实现厢面整形,在旋压过程中厢面土壤会产生一定的塑性变形而呈现高度差,从而构建凸垄厢面并稳定畦沟沟墙^[23-24]。由于镇压辊采用对称结构,在作业过程中轴向受力均衡,在受力分析时主要考虑周向受力,为简化模型假定整形辊各段受到土壤支持力方向相同,整体受力分析如图8所示。

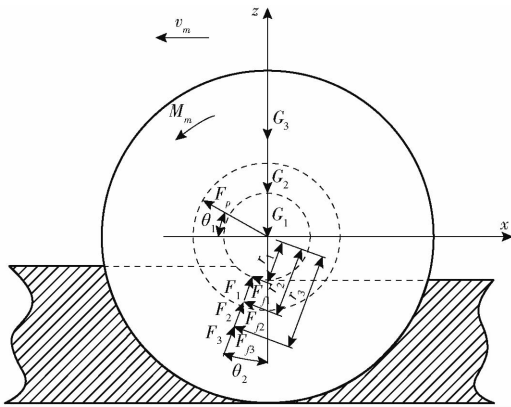


图8 变轴颈整形辊与土壤之间受力分析

Fig.8 Curve shape and parameters of variable journal shaping roller

其平衡关系应满足

$$\begin{cases} F_{f1} + F_{f2} + F_{f3} + F_p \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 - \theta_2\right) - \\ (G_1 + G_2 + G_3) \sin\theta_2 = 0 \\ F_1 + F_2 + F_3 - F_p \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_1 - \theta_2\right) - \\ (G_1 + G_2 + G_3) \cos\theta_2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $F_{f1} = \mu F_1$ $F_{f2} = \mu F_2$ $F_{f3} = \mu F_3$

式中 F_p ——机具对整形辊牵引力,N

F_1 ——垄体对整形辊中间直段支持力,N

F_2 ——垄体对整形辊锥段支持力,N

F_3 ——畦沟沟墙对整形辊喇叭口段支持力,N

F_{f1} ——垄体对整形辊中间直段摩擦力,N

F_{f2} ——垄体对整形辊锥段摩擦力,N

F_{f3} ——畦沟沟墙对整形辊喇叭口段摩擦力,N

G_1 ——变轴颈整形辊中间直段重力,N

G_2 ——变轴颈整形辊两侧锥段重力,N

G_3 ——变轴颈整形辊喇叭口段重力,N

μ ——整形镇压辊与土壤间摩擦因数

θ_1 ——牵引力 F_p 与 x 轴夹角,(°)

θ_2 ——垄体支持力与 z 轴夹角,(°)

为使得整形辊可以正常作业,整形辊驱动力矩 M_m 、牵引力 F_p 应满足

$$\begin{cases} M_m \geq r_1 F_{f1} + r_2' F_{f2} + r_3 F_{f3} \\ F_p = \frac{F_1 + F_2 + F_3 - (G_1 + G_2 + G_3) \cos\theta_2}{\cos(\pi/2 + \theta_1 - \theta_2)} \end{cases} \quad (12)$$

式中 r_2' ——整形辊锥段等效直径,mm

r_3 ——整形辊喇叭口段等效直径,mm

在整形作业中,整形部件驱动力矩受厢面镇压力、整形辊与土壤间的摩擦因数 μ 、整形辊几何参数等影响,实际驱动力矩需要考虑土壤含水率进行调节。牵引力主要受厢面镇压力的影响,为构造合理种床,需设计仿形部件控制整形部件镇压力。

2.3 仿形机构

适当的镇压可减少地表土块间隙,减少水分蒸发,有利于地下水在毛细作用下提升到地表,促进种子发芽,进而提高油菜成苗率^[25-26]。为满足整形辊镇压力可实时调节的作业要求,设计了仿形机构。仿形机构主要由机架、挂接臂、弹簧支承杆、支承弹簧和可旋转支承座组成,为曲柄滑块机构,其结构示意图如图9a所示。支承弹簧将整形辊稳定在理想厢面位置并可跟随田间工况上下浮动。

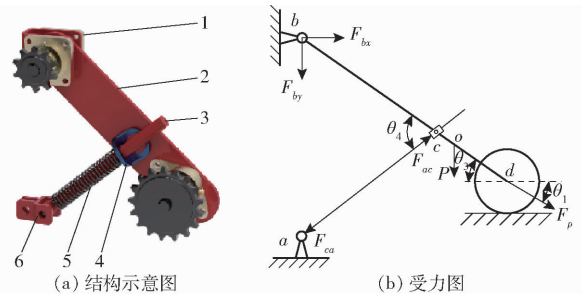


图9 仿形机构结构示意图和受力图

Fig.9 Schematic and force diagram of profiling mechanism

1.挂接臂 2.挂接臂 3.弹簧支承杆 4.可旋转支承座 5.仿形弹簧 6.支撑座

仿形部件具有空载时由弹簧完全提供支撑力和田间作业时土壤和弹簧共同提供支撑力的两种工况,为分析仿形弹簧力学要求需进行受力分析。受力图如图9b所示, a 、 b 与机架铰接, bd 为挂接臂, ac

为弹簧支承杆, d 为变轴颈整形辊回转中心。以 bd 杆为研究对象, 此时力学平衡方程为

$$l_{bc}F_{ac}\sin\theta_4 - l_{bo}P\cos\theta_3 + l_{bd}F_p\sin(\theta_3 - \theta_1) = 0 \quad (13)$$

式中 l_{bc} ——挂接座与可旋转支撑座距离, mm
 l_{bd} ——挂接臂长度, mm
 l_{bo} ——挂接座与挂接臂重心距离, mm
 F_{ac} ——弹簧提供的支持力, N
 P ——挂接臂与可旋转支撑重力, N
 θ_3 ——挂接臂与厢面夹角, ($^\circ$)
 θ_4 ——挂接臂与弹簧支承杆夹角, ($^\circ$)

则弹簧需要提供的支持力 F_{ac} 为

$$F_{ac} = \frac{l_{bo}P\cos\theta_3 - l_{bd}F_p\sin(\theta_3 - \theta_1)}{l_{bc}\sin\theta_4} \quad (14)$$

由设计参数可知, l_{bc} 、 l_{bd} 、 l_{bo} 分别为 293.5、445、352 mm, 根据几何关系, 在田间作业时 θ_3 为 $40.36^\circ \sim 47.06^\circ$, θ_4 为 $82.15^\circ \sim 89.06^\circ$, 则仿形弹簧需要提供的支撑力 $732.90 \text{ N} < F_{ac} < 1278.70 \text{ N}$ 。

仿形弹簧选用牌号 60Si2MnA 高级优质合金弹簧钢材料, 两端并紧且磨平, 支撑圈数 1 圈。弹簧中径 D 参考支撑杆直径取 40 mm, 工作行程 h_z 根据整形辊上下浮动极限位置取 50 mm。依据文献[27]设计弹簧可得

$$\begin{cases} F_m = P_1 h_z / (P_n - P_1) \\ F_n = P_n h_z / (P_n - P_1) \\ n_z = Gd^4 F_n / (8P_n D^3) + 2 \\ H_b = (n_z + 1.5)d \\ H_0 = H_b + F_b \\ t = (H_0 - 1.5d) / n_z \\ \gamma = \arctan(t / \pi D) \end{cases} \quad (15)$$

式中 d ——弹簧线径, mm

P_n ——弹簧最大工作载荷, N

P_1 ——弹簧最小工作载荷, N

F_m ——最小工作载荷下弹簧形变量, mm

F_n ——最大工作载荷下弹簧形变量, mm

G ——切变模量, MPa

F_b ——弹簧被全部压缩时的形变量, mm

n_z ——弹簧总圈数

H_b ——弹簧被全部压缩时高度, mm

H_0 ——弹簧自由高度, mm

t ——弹簧节距, mm

γ ——弹簧螺旋角, ($^\circ$)

其中 G 取 79 000 MPa, 弹簧线径为 5 mm, 代入式(15)计算得弹簧自由高度 H_0 为 264.80 mm, 弹簧被压缩时高度 H_b 为 97.50 mm, 弹簧总圈数 n_z 为 20

圈, 节距 t 为 14.29 mm, 螺旋角 γ 为 6.49° , 整形部件采用左右布置的两根弹簧共同提供仿形能力。

3 仿真试验

3.1 仿真模型建立

土壤颗粒间采用 Hertz - Mindlin with Bonding 接触模型^[28-29], 利用离散元软件 EDEM 对装置作业过程进行仿真分析。土壤颗粒设置为半径为 8 mm 球型颗粒, 虚拟土槽长、宽、高为 3 200、3 200、1 000 mm, 以地表为基准深度 0 ~ 50 mm 为上层、50 ~ 100 mm 为中层、余下部分为下层, 分别赋予蓝色、绿色、红色。仿真模型参数和接触模型参数参照文献[29-31]选取。仿真模型如图 10 所示, 参数如表 2 所示。

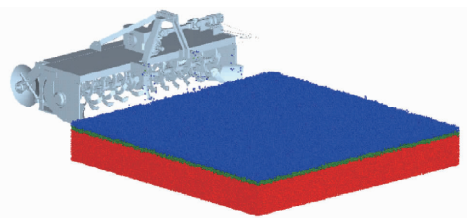


图 10 仿真模型

Fig. 10 Simulation model

表 2 仿真参数

Tab. 2 Contact parameters of model

类型	参数	数值	类型	参数	数值
土壤	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 315	钢材	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850
	泊松比	0.37		泊松比	0.30
	剪切模量/ Pa	1.82×10^6		剪切模量/ Pa	7.90×10^{10}
土壤	恢复系数	0.363	土壤	恢复系数	0.422
	静摩擦因数	0.422		静摩擦因数	0.482
土壤	动摩擦因数	0.282	钢材	动摩擦因数	0.222

3.2 试验方法

为获得最佳厢面整形效果, 以前进速度 A 、旋耕刀转速 B 、整形辊转速 C 为试验因素, 以凸垄厢面倾角 α 和畦沟沟墙倾角 β 作为试验指标。通过 Design-Expert 软件采用 Box - Behnken 试验方法设计三因素三水平正交组合试验。旋耕刀转速参照现有旋耕机常用速比, 选择旋耕刀转速为 230 ~ 360 r/min; 长江中下游地区稻茬田油菜直播机最低作业速度为 2 km/h^[32], 结合装置设计速度要求, 设定仿真试验前进速度为 2 ~ 5 km/h; 考虑作业对象土壤黏重且留有残茬, 为获得理想厢面, 整形辊转速应适当提高, 因此将整形辊转速 0 水平设计为 155 r/min, 1 水平设计为 190 r/min, 使得理论最高转速处于为 0、1 水平中间, 则整形辊转速为 120 ~ 190 r/min。试验因素编码如表 3 所示。

表3 因素编码
Tab.3 Factors and codings

编码	因素		
	前进速度 $A/$ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	旋耕刀转速 $B/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	整形辊转速 $C/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
-1	2.0	230	120
0	3.5	295	155
1	5.0	360	190

仿真结束后,利用 Clipping 工具对整机作业后土壤稳定区进行采样,等距截取 5 个土壤切片样本,进行轮廓提取,如图 11 所示,厢面与水平面夹角为厢面倾角 α ,畦沟沟墙与水平面夹角为沟墙倾角 β 。通过拟合厢面与沟墙轮廓,测量各切片轮廓厢面倾角和沟墙倾角,各倾角平均值即为该作业工况下厢面倾角和沟墙倾角。

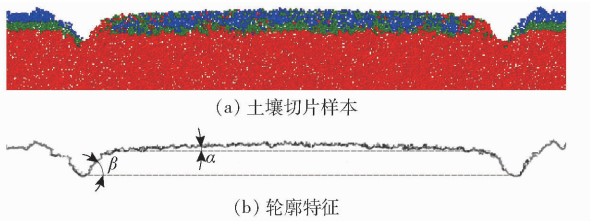


图 11 厢面倾角和沟墙倾角测量方法

Fig.11 Methods for measuring box surface inclination angle and furrow wall inclination angle

3.3 结果分析

试验仿真结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 4 仿真试验结果
Tab.4 Simulation test results

试验序号	因素			厢面倾角 $\alpha/(\text{°})$	沟墙倾角 $\beta/(\text{°})$
	前进速度 X_1	旋耕刀转速 X_2	整形辊转速 X_3		
1	1	1	0	3.18	46.20
2	0	-1	-1	2.31	50.57
3	1	0	1	2.84	46.95
4	0	0	0	3.74	52.05
5	-1	-1	0	3.15	47.16
6	0	1	1	3.36	48.92
7	0	-1	1	2.79	50.75
8	-1	0	-1	4.37	50.97
9	0	0	0	3.19	52.20
10	0	1	-1	3.68	51.13
11	-1	1	0	5.54	52.87
12	0	0	0	3.29	57.20
13	0	0	0	3.05	53.27
14	-1	0	1	4.22	48.72
15	1	-1	0	2.31	53.89
16	0	0	0	3.22	55.38
17	1	0	-1	2.91	51.43

使用 Design-Expert 软件处理相关数据,以厢面倾角 α 和沟墙倾角 β 为因变量建立回归模型,方差分析结果如表 5 所示。

表 5 回归模型方差分析

Tab.5 Analysis of variance of regression model

评价指标	变异来源	平方和	自由度	均方和	F	P
α	模型	9.46	9	1.05	13.94	0.001 1**
	X_1	4.56	1	4.56	60.60	0.000 1**
	X_2	3.38	1	3.38	44.92	0.000 3**
	X_3	0.000 5	1	0.000 5	0.006 0	0.940 5
	X_1X_2	0.58	1	0.58	7.68	0.027 7*
	X_1X_3	0.001 6	1	0.001 6	0.021	0.888 2
	X_2X_3	0.16	1	0.16	2.13	0.188 1
	X_1^2	0.67	1	0.67	8.89	0.020 5*
	X_2^2	0.097	1	0.097	1.28	0.294 4
	X_3^2	0.052	1	0.052	0.7	0.431 8
β	残余	0.53	7	0.075		
	失拟	0.25	3	0.084	1.22	0.410 1
	误差	0.27	4	0.069		
	总和	9.99	16			
	模型	118.18	9	13.13	4.04	0.039 7*
	X_1	0.193 8	1	0.193 8	0.059 5	0.814 2
	X_2	1.32	1	1.32	0.404 5	0.545 0
	X_3	9.59	1	9.59	2.95	0.129 7
	X_1X_2	44.92	1	44.92	13.81	0.007 5**
	X_1X_3	1.24	1	1.24	0.382 1	0.556 1
X_2X_3	1.43	1	1.43	0.438 9	0.528 9	
β	X_1^2	24.42	1	24.42	7.50	0.028 9*
	X_2^2	10.55	1	10.55	3.24	0.114 7
	X_3^2	18.47	1	18.47	5.68	0.048 7*
	残余	22.78	7	3.25		
	失拟	3.06	3	1.02	0.206 9	0.886 8
	误差	19.72	4	4.93		
	总和	140.96	16			

注: **表示差异极显著($P < 0.01$), *表示差异显著($0.01 \leq P < 0.05$)。

由表 5 可知,厢面倾角 α 回归模型 $P < 0.01$,沟墙倾角 β 回归模型 $P < 0.05$,失拟项均大于 0.05,表明回归模型准确,拟合度较好。

针对厢面倾角 α ,前进速度 X_1 、旋耕刀转速 X_2 两个回归项对厢面倾角影响极显著,前进速度平方项 X_1^2 、交互项 X_1X_2 影响显著;针对畦沟沟墙倾角 β ,前进速度和旋耕刀转速交互项 X_1X_2 对沟墙倾角具有极显著影响,前进速度平方项 X_1^2 、整形辊转速平方项 X_3^2 两个回归项对沟墙倾角影响显著,前进速度和旋耕刀转速交互项 X_1X_2 对沟墙倾角影响最大。剔除不显著项后,构建相应的回归响应曲面方程为

$$\begin{cases} \alpha = 3.18 - 0.76X_1 + 0.65X_2 - 0.01X_3 - 0.38X_1X_2 + \\ \quad 0.38X_1^2 \\ \beta = 53.35 - 0.16X_1 - 0.41X_2 - 1.1X_3 - 3.35X_1X_2 - \\ \quad 2.49X_1^2 - 2.18X_3^2 \end{cases} \quad (16)$$

由表 5 可知,交互项中仅 X_1X_2 表现显著,为研究前进速度和旋耕刀转速交互作用对厢面倾角和沟墙倾角的影响规律,将整形辊转速设为 155 r/min,构建响应曲面如图 12 所示。由图 12a 可知,当旋耕刀转速各水平下,厢面倾角随着旋耕刀转速增大而增大,且在前进速度较低时该趋势更为明显;在前进速度各水平下,厢面倾角随着前进速度增大呈先降低后趋于平缓的趋势,在旋耕刀转速较高时该趋势更为明显。由图 12b 可知,在低前进速度工况下沟墙倾角随旋耕刀转速增大而增大,在高前进速度工况下随旋耕刀转速增大而减小;前进速度对沟墙倾角的影响与之相似。在低旋耕刀转速低前进速度和高旋耕刀转速高前进速度的工况下,构建的沟墙倾角较小,未实现设计预期,主要是由于单位区间内土壤分布不均,过于向厢面中间汇集,两侧土壤较少,导致整形辊进行旋压整形时构建沟墙不符合预期。因此,为获得较为稳定的厢面倾角和较大的沟墙倾角,在整形辊速度一定的条件下,需满足较高的前进速度,并保持较低的旋耕刀转速。

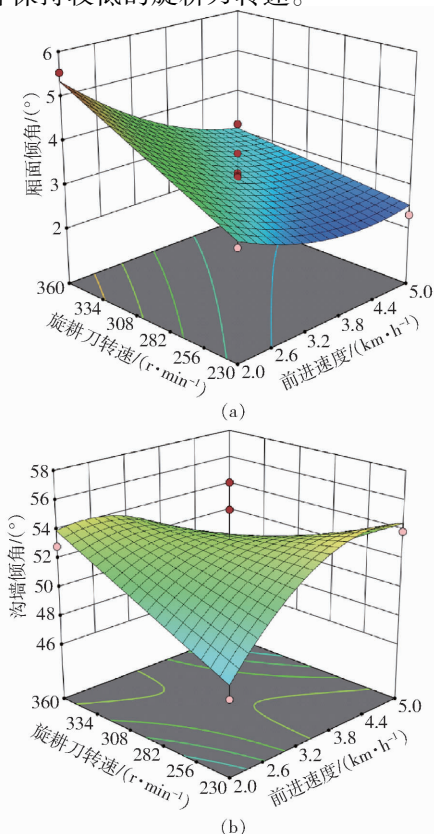


图 12 交互作用响应曲面 ($X_3 = 0$)

Fig. 12 Response surfaces for interaction

3.4 参数优化

在优化运行参数时,厢面倾角应与变轴颈整形辊的锥段设计角度保持一致,同时,为构建稳定沟墙,减小排水畦沟上沟宽,沟墙倾角应尽可能大。使用 Design-Expert 软件的 Optimization 模块进行较优运行参数预测,模型方程及边界条件为

$$\begin{cases} \alpha(A, B, C) = 3^\circ \\ \max \beta = f(A, B, C) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 2 \text{ km/h} \leq A \leq 5 \text{ km/h} \\ 230 \text{ r/min} \leq B \leq 360 \text{ r/min} \\ 120 \text{ r/min} \leq C \leq 190 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

求解可得,在该仿真模型下部件的较优运行参数为:前进速度 3.8 km/h、旋耕刀转速 278 r/min、整形辊转速 147 r/min。为便于机器加工,旋耕刀转速设为 280 r/min,使用该运行参数进行仿真试验,此时厢面倾角为 3.03° ,畦沟沟墙倾角为 54.25° 。

4 田间试验

4.1 试验条件

为检验凸垄厢面构建装置的设计性能,验证优化结果,设计油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置,在华中农业大学现代农业科技试验基地,开展凸垄厢面构建装置田间试验。试验地块为常规稻茬地,地表覆盖有联合收获机作业残茬,土质黏重,试验工况如表 6 所示。整机配套动力为雷沃欧豹 M1004 型拖拉机,后挂接有油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置,试验设备包括三维激光扫描仪 (TrimbleTx8 型)、土壤坚实度测定仪、电子天平、卷尺、直尺和干燥箱等。

表 6 试验前各田间工况参数

Tab. 6 Field conditions before test

参数	数值
土壤坚实度/kPa	2 914.63
土壤含水率/%	23.13
土壤容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.51
地表秸秆量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	1 216.37
秸秆含水率/%	52.31
秸秆留茬高度/mm	213.62

4.2 试验方法

田间试验时机具前进速度为 3.8 km/h、旋耕刀转速为 280 r/min、整形辊转速为 147 r/min,单次作业行程为 50 m,取中间 30 m 为测量区域。参考标准 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》、GB/T 5668—2008《旋耕机》与 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》,结合机器设计和油菜种植农艺要求,确定凸垄厢面构建装置试验指标为:厢面和

沟墙倾角及稳定性系数、畦沟沟形及稳定性系数、厢面平整度、土壤坚实度、碎土率、秸秆埋覆率等^[33]。其中厢面倾角、沟墙倾角、厢面平整度测定方法如下：

在厢面表型特征和沟形特征测量时,采用非接触式扫描分析方法,待机具作业完成后,使用三维激光扫描仪获取厢面三维形状点云图。在整机稳定作业区域内,等距截取厢面云图上 10 个轮廓,通过对截面轮廓进行曲线拟合,测量截面厢面倾角和沟墙倾角,以均值表示机具作业后厢面倾角和沟墙倾角,计算式为

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i}{N} \\ \beta_x = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i}{N} \end{cases} \quad (18)$$

式中 N ——作业区域内选定的截面数目

α_i ——第 i 组测量区域内厢面倾角, ($^\circ$)

α_x ——田间厢面倾角, ($^\circ$)

β_i ——第 i 组测量区域内沟墙倾角, ($^\circ$)

β_x ——田间沟墙倾角, ($^\circ$)

测量厢面平整度时,提取厢面截面轮廓并进行曲线拟合,增设整形辊理想曲线轮廓作为基准曲线,然后在厢面上等距取点,测定地表至基准曲线的距离,可得每一截面平整度,厢面平整度计算式为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad (19)$$

其中

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} |X_{ij} - X'_{ij}|}{N_i} \quad (20)$$

式中 X_{ij} ——第 i 段截面第 j 个点的基准曲线坐标值, mm

X'_{ij} ——第 i 段截面第 j 个点的厢面轮廓坐标值, mm

N_i ——第 i 段截面取点数量

P_i ——第 i 段截面平整度, mm

\bar{P} ——厢面平整度, mm

4.3 试验结果与分析

4.3.1 凸垄厢面构建质量

凸垄厢面构建装置田间作业效果及厢面点云图如图 13 所示,厢面构建质量如表 7 所示,整机作业后厢面平整,畦沟沟形稳定,沟底干净无杂土,种沟清晰,刀辊无缠草现象发生,整机通过性良好。为检验凸垄厢面构建效果,开展田间灌水试验,效果如图 13b 所示。试验结果表明,水位由畦沟沟底逐步

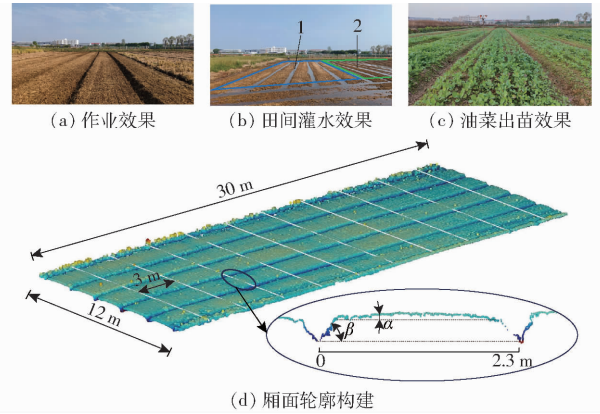


图 13 田间作业效果

Fig. 13 Field experiment effects

1. 凸垄厢面构建装置作业区域 2. 平面厢面作业区域

表 7 厢面构建质量

Tab. 7 Construction effect of box surface

参数	数值	参数	数值
厢面倾角/ $^\circ$	2.94	厢面倾角稳定性系数/%	95.45
沟墙倾角/ $^\circ$	49.09	沟墙倾角稳定性系数/%	90.82
畦沟沟深/mm	185.34	沟深稳定性系数/%	94.36
畦沟沟宽/mm	371.82	沟宽稳定性系数/%	93.71
土壤坚实度/kPa	1 267.44	土壤坚实度稳定性系数/%	91.77
厢面平整度/mm	12.31	种床碎土率/%	88.31
秸秆埋覆率/%	89.32		

上升,直至与厢面边缘齐平,随后逐步由厢面两侧蔓延至厢面中央。在此期间同地块其他播种机作业后平面厢面,出现了不同程度的厢面中央积水现象。

由表 7 可知,凸垄厢面构建装置作业后厢面倾角为 2.94° ,沟墙倾角为 49.09° ,倾角稳定性系数均大于 90%;畦沟平均沟深为 185.34 mm,沟宽为 371.82 mm,沟深及沟宽稳定性系数均大于 90%,符合机具设计要求;厢面平均土壤坚实度为 1 267.44 kPa,相较于未作业地表降低 56.51%,土壤坚实度稳定性系数为 91.77%,仿形装置镇压力控制效果较好;厢面平整度为 12.31 mm,种床碎土率为 88.31%,秸秆埋覆率为 89.32%,机具厢面构建效果满足油菜直播作业要求。播种作业 45 d 后出苗效果如图 13c 所示,苗期苗全,出苗一致性好,保苗量为 3.945×10^5 株/ hm^2 ,满足油菜种植要求。

4.3.2 畦沟沟形演变

为检验凸垄厢面构建装置作业后畦沟沟形的稳定性,采用 Trimble 激光扫描仪和取形器获取畦沟沟形轮廓,跟踪分析凸垄厢面构建装置播种作业后的畦沟沟形演变。通过多次测取拟合得到畦沟沟形曲线,畦沟深度随时间变化曲线如图 14 所示。由图 14 可以看出,随着时间的推移,厢面边缘的土壤会缓慢下沉到畦沟中,畦沟沟深不断变浅,上沟宽不

断增大。在油菜生长周期内,平均畦沟深度由 18.53 cm 变至 12.66 cm,平均畦沟深度减小 31.68%,平均上畦沟宽度由 37.18 cm 变宽至 45.23 cm,平均上畦沟宽度增大 21.65%。在整个跟踪周期内,畦沟沟形呈缓慢趋平的规律,未出现因沟墙坍塌导致影响田间排水现象。

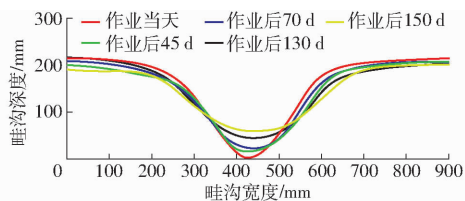


图 14 畦沟深度随时间的变化曲线

Fig. 14 Curves of furrow depth changing with time

5 结论

(1)提出了一种凸垄种床构建工艺,设计了一种油菜精量联合直播机凸垄种床构建装置,可一次完成旋耕灭茬、畦沟开设、厢面整形、播深控制等功能,实现了油菜精量直播作业要求。

(2)根据作业要求,对开畦沟犁组的犁体曲面、

变轴颈整形辊的几何参数、仿形机构的仿形弹簧进行了设计,阐述了各部件的作业原理,确定了各部件关键设计参数。应用 EDEM 软件,以前进速度、旋耕刀辊转速和整形辊转速为试验因素,建立仿真模型,综合考虑得到起垄整形部件较优运行参数为前进速度 3.8 km/h、旋耕刀转速 280 r/min、整形辊转速 147 r/min。

(3)田间试验结果表明,在较优运行参数作业工况下,油菜精量联合直播机凸垄厢面构建装置作业后凸垄厢面轮廓及畦沟沟形稳定,仿形部件镇压力控制效果较好,厢面倾角为 2.94°,沟墙倾角为 49.09°,倾角稳定性系数均大于 90%,厢面平整度为 12.31 mm,土壤坚实度稳定性系数为 91.77%,沟深及沟宽稳定性系数均大于 90%,条形种沟明显,出苗效果良好,保苗量为 3.945×10^5 株/hm²;通过跟踪油菜生育周期内畦沟沟形演变情况,发现经过整个冬春油菜生育期,平均畦沟深度减小 31.68%,平均上沟宽度增大 21.65%,未出现沟墙坍塌现象;装置畦沟开设质量、厢面整形质量、镇压力控制效果和播深控制效果,均满足油菜直播种植要求。

参 考 文 献

- [1] 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)
- [2] 廖庆喜,林建新,张青松,等. 稻油轮作区铲式油菜直播种床整备机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):26-35.
LIAO Qingxi, LIN Jianxin, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of shovel type seedbed preparation machine suitable for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 26-35. (in Chinese)
- [3] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等. 油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(2):65-75.
LIAO Yitao, GAO Liping, LIAO Qingxi, et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 65-75. (in Chinese)
- [4] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报,2021,40(2):24-44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24-44. (in Chinese)
- [5] 包攀峰,吴明亮,官春云,等. 犁旋组合式油菜播种开沟起垄装置设计[J]. 农业工程学报,2017,33(20):23-31.
BAO Panfeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 23-31. (in Chinese)
- [6] 宋丰萍,胡立勇,周广生,等. 渍水时间对油菜生长及产量的影响[J]. 作物学报,2010,36(1):170-176.
SONG Fengping, HU Liyong, ZHOU Guangsheng, et al. Effects of waterlogging time on rapeseed growth and yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(1): 170-176. (in Chinese)
- [7] 李玲,张春雷,张树杰,等. 渍水对冬油菜苗期生长及生理的影响[J]. 中国油料作物学报,2011,33(3):247-252.
LI Ling, ZHANG Chunlei, ZHANG Shujie, et al. Effects of waterlogging on growth and physiology of winter rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2011, 33(3): 247-252. (in Chinese)
- [8] 张青松,汲文峰,廖宜涛,等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J]. 农业机械学报,2014,45(2):130-135.
ZHANG Qingsong, JI Wenfeng, LIAO Yitao, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 130-135. (in Chinese)

- [9] 张青松,廖庆喜,汲文峰,等. 油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(1):53-59.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 53-59. (in Chinese)
- [10] 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):79-87.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79-87. (in Chinese)
- [11] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与EDEM的船型开沟装置触土曲面优化[J]. 农业机械学报,2019,50(8):59-69.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 59-69. (in Chinese)
- [12] 何进,李洪文,张学敏,等. 1QL-70型固定垄起垄机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):55-60.
HE Jin, LI Hongwen, ZHANG Xuemin, et al. Design and test of 1QL-70 fixed ridge ridging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 55-60. (in Chinese)
- [13] 林静,张桐嘉,陈彬,等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):28-39.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, CHEN Bin, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 28-39. (in Chinese)
- [14] 刘海,张青松,廖宜涛,等. 小白菜复式播种机犁旋辊压驳岸型种床起垄装置研究[J]. 农业机械学报,2021,52(11):40-48,77.
LIU Hai, ZHANG Qingsong, LIAO Yitao, et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 40-48, 77. (in Chinese)
- [15] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏,等. 雪茄烟叶可调式苗床起垄铺膜机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):116-126,295.
DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116-126, 295. (in Chinese)
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京:中国农业机械出版社,2007.
- [17] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003
- [18] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):16-25.
SHI Yuliang, CHEN Xinyu, CHEN Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16-25. (in Chinese)
- [19] GB 50288—2018 灌溉与排水工程设计规范[S]. 2018.
- [20] HUFFMAN R L, FANGMEIER D D, ELLIOT W J, et al. Soil and water conservation engineering[M]. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013.
- [21] 王金峰,王金武,孔彦军,等. 悬挂式水田筑埂机及其关键部件研制与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(6):28-34.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, KONG Yanjun, et al. Development and experiment of suspension ridger and its key components for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 28-34. (in Chinese)
- [22] 张明华,王在满,罗锡文,等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):10-15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of furrowing device of precision hill-drop drilling machine for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 10-15. (in Chinese)
- [23] 谢斌,罗振豪,宋正河,等. 非道路车辆轮胎-土壤相互作用建模方法及试验技术综述[J]. 农业工程学报,2022,38(11):51-63.
XIE Bin, LUO Zhenhao, SONG Zhenghe, et al. Review of off-road vehicle tire - soil interaction modeling methods and experimental techniques[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(11): 51-63. (in Chinese)
- [24] 杨敏丽,彭健,金剑,等. 不同农用轮胎对东北黑土区土壤压实的影响[J]. 农业机械学报,2023,54(6):85-93.
YANG Minli, PENG Jian, JIN Jian, et al. Influence of agricultural tire technology innovation on soil compaction in black soil region northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 85-93. (in Chinese)
- [25] 赵振家,邹猛,薛龙,等. 压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):311-313,338.
ZHAO Zhenjia, ZOU Meng, XUE Long, et al. Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 311-313, 338. (in Chinese)
- [26] 王宪良,王庆杰,李洪文,等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(6):168-175.
WANG Xianliang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Effect of tyre induced soil compaction on soil properties and crop root growth under no-tillage system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 168-175.

(in Chinese)

- [27] 秦大同,谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- [28] 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)
- [29] 张青松,齐涛,敖倩,等. 油菜机械直播机开沟浅旋装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):58-67,104.
ZHANG Qingsong, QI Tao, AO Qian, et al. Design and experiment of rapeseed direct seeding machine with furrow opener and shallow plowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 58-67, 104. (in Chinese)
- [30] 王磊,边祺旺,廖庆喜,等. 高茬黏重稻茬田油菜直播埋茬防堵深施肥复合装置研究[J]. 农业机械学报,2023,54(2):83-94.
WANG Lei, BIAN Qiwan, LIAO Qingxi, et al. Burying stubble and anti-blocking deep fertilization composite device for rapeseed direct planting in high stubble and heavy soil rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 83-94. (in Chinese)
- [31] 李蒙良,廖庆喜,裴立民,等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(5):47-58,90.
LI Mengliang, LIAO Qingxi, PEI Limin, et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 47-58, 90. (in Chinese)
- [32] 张青松,廖庆喜,肖文立,等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):702-711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702-711. (in Chinese)
- [33] 康艳,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜宽幅折叠式浅旋精量联合直播机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):42-52,109.
KANG Yan, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Design and experiment of rapeseed wide-width folding shallow-rotation combined precision direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 42-52, 109. (in Chinese)

(上接第120页)

- [18] YANG R, WANG Z, SHANG S, et al. The design and experimentation of EVPIVS - PID harvesters' header height control system based on sensor ground profiling monitoring[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 282.
- [19] BOSHOFF B V D. Automatic depth control for seed planter based on soil conductance sensing[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1970.
- [20] NIELSEN S K, NØRREMARK M, GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 690-698.
- [21] ISMAIL Z, ISMAIL N, SALEM S. Simulation of down force for no-till seeder using ultrasonic and arduino elements[J]. Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, 2017, 8(10): 509-514.
- [22] 付卫强,董建军,梅鹤波,等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):68-77.
FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68-77. (in Chinese)
- [23] ZHOU L, MA Y, ZHOU H, et al. Design and test of sowing depth measurement and control system for no-till corn seeder based on integrated electro-hydraulic drive[J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 5823.
- [24] 衣淑娟,李怡凯,陈继国,等. 俯仰式播种单体仿形性能检测试验台设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):90-100.
YI Shujuan, LI Yikai, CHEN Jiguo, et al. Design and test of pitching seeding unit profiling performance testing bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 90-100. (in Chinese)
- [25] 汤庆,吴俊,蒋兰,等. 油菜耕整移栽联合作业机液压仿形系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 95-102.
TANG Qing, WU Jun, JIANG Lan, et al. Design and test of hydraulic profiling system for rape seedling combined transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 95-102. (in Chinese)
- [26] 吕金庆,杨晓涵,冯雪,等. 马铃薯播种机播深调控装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(12):13-21.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, FENG Xue, et al. Design and experiment of sowing depth control device of potato planter[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 13-21. (in Chinese)