

水田带状复式整地机关键部件设计与试验

孙文峰 付天鹏 何跃 卢佳琪 常晋恺 王吉权
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对水稻宽窄行栽培模式中苗床整地的技术特点,设计一种带状少耕整地复式作业机具,解决规模化水田整地作业的少、免耕技术问题,实现水田苗床间隔精细整地、浅松及条施肥复式作业。根据现有水稻宽窄行种植行距要求,通过对其带状旋耕部件运动学分析以及特殊旋耕刀片设计,确定了带状旋耕机构的关键参数,实现 300 mm 整地作业带,相邻 300 mm 区域为免耕带;通过 EDEM 离散元运动学仿真,运用正交旋转组合试验的方法优化多区段旋耕刀组最佳排列方式、机具的前进速度和刀轴转速。田间试验结果表明,水田带状旋耕复式整地机碎土率、地表平整度、单条耕作带宽、耕作带宽稳定性系数分别为 92.97%、18.4 mm、300.9 mm、95.3%,满足规模化水稻苗床土壤整地要求。

关键词: 水田; 复式整地机; 带状旋耕; 离散元法; 田间试验

中图分类号: S222.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0050-13 OSID: 

Design and Test on Key Components of Strip Compound Ground Preparation Machine in Paddy Field

SUN Wenfeng FU Tianpeng HE Yue LU Jiaqi CHANG Jinkai WANG Jiquan
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Under the background of conservation tillage, the advantages of less tillage and no-tillage cultivation techniques, such as water storage and soil conservation, have been emphasized. In order to solve the shortcomings of full tillage, a belt tillage machine was designed for seedbed preparation, and its key components were studied. According to the existing wide and narrow planting row spacing of rice, belt land preparation with 30 cm bandwidth was realized by selecting rotary blade and designing blade arrangement. Meanwhile, no-tillage operation was carried out in the adjacent 30 cm area to realize the purpose of fine land preparation between paddy beds. After one operation, seedling transplanting could be carried out in the water field. The orthogonal rotation test method was used to simulate the actual field operation through EDEM discrete element simulation, and the optimal arrangement of strip rotary blades was obtained. At this time, the simulation results were as follows: the soil crushing rate was 93.26%, and the surface flatness was 17.3 mm. On this basis, field experiments were carried out, and the results showed that the soil crushing rate, surface flatness, single tillage bandwidth, and tillage bandwidth stability of multi-functional combined tillage machine were 92.97%, 18.4 mm, 300.9 mm, 95.3%, respectively. The stability of tillage depth, shallow subsoil depth, tillage depth and deep subsoil depth were 151.3 mm, 221.4 mm, 93.5% and 92.3%, respectively, which fully met the needs of large-scale rice seedbed soil preparation. The research was focused on determining the structural parameters of strip rotary tillage, ensuring the stability of tillage bandwidth and good operation results. It provided reference for the design and research of less and no-tillage equipment for paddy field.

Key words: paddy field; combined ground preparation machine; belt rotary tillage; discrete element method; field experiment

0 引言

水稻耕整地机械化是水稻生产机械化的重要环节,其可为水稻生长提供良好的土地基础^[1-2]。在保护性耕作的大背景下,水稻宽窄行栽培模式得到广泛应用^[3-6],它解决了水稻生产中个体与群体、密度与通风透光的矛盾问题,体现出较高的增产优势。为适应少免耕带状苗床整地作业需要,水田的带状整地模式被提出^[7-9],该模式对秧苗生长区域进行整地作业,而其余区域为免耕区,使水稻的耕作环节得到简化,大幅度减小作业量,降低整地作业动力消耗,节省泡田用水量,减少生产投入。近年来,为提高机具作业效率,最大限度地减少机械进地的次数,复式作业已成为农业机械耕作发展方向^[10-13]。

国内外学者对带状复式整地装备展开了研究。美国 Northwest Tillers 公司生产的条带耕整机^[14],采用条带旋耕后碎土镇压的作业方式,通过调整旋耕刀排布适应洋葱、豆类、玉米、棉花、胡萝卜等作物的耕作要求。美国 Yetter 2984 Maverick HR Plus 型条带耕整机^[15],可完成切茬、清秸、松土、碎土等作业,由于各工作部件均安装有安全回位弹簧,能够根据各自所需的预紧压力和作业要求进行单独调节,提高单体的仿形能力和可靠性。贾洪雷等^[16]设计的 IGH-3 型行间耕整机,能够使机具根据耕作要求实现行间浅旋、垄台碎茬及全幅旋耕 3 种作业模式的转换。李向军等^[17]设计的组合式灭茬、苗带旋耕整地机,针对高寒垄作地区保护性耕作残茬难处理问题,能一次完成垄上灭茬、垄中带状旋耕、耕后回土镇压等多项作业,实现秸秆全量还田,并将传统耕作和少耕相结合,既可进行复式作业,也可完成单项作业。许春林等^[18]设计的斜置式螺旋带状整地试验装置,具有作业效率高、作业功耗低、碎土率高等优点。但对带状复式整地机械的研究大多集中在旱田方面^[19-21],针对于水田带状复式整地机具研究较少。

本文针对水稻插秧苗床整地技术的特点,设计一种带状少耕整地复式作业机具,并对其整地关键部件进行研究,机器作业后一次泡田即可进行秧苗插秧作业。重点进行带状旋耕结构参数设计及多区段旋耕刀片的排列方式优化,确保耕作带宽的稳定性及作业效果良好,以期为水田少免耕装备研发与优化提供理论支撑和技术参考。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

水田带状复式整地机可以实现一次作业完成水

稻苗床的浅松、带状旋耕及侧深施肥等功能,其整体结构如图 1 所示,主要参数如表 1 所示。整机由拖拉机三点悬挂连接,主要由浅松部件、机架总成、多区段旋耕部件、限深机构、划印器、施肥系统及传动系统等部件组成。其中浅松铲、多区段旋耕部件及开沟施肥铲从前至后以纵向中心线相重合的方案配装,通过设计作业宽度匹配水稻宽窄行插秧苗床宽度尺寸,从而实现水田少耕复式作业;肥箱总成配装在机架总成后侧上部与开沟施肥铲总成连通;两侧的限深拖板既可调节整机作业深度,也可与地面接触呈支撑配合,完成机具的停放保管。

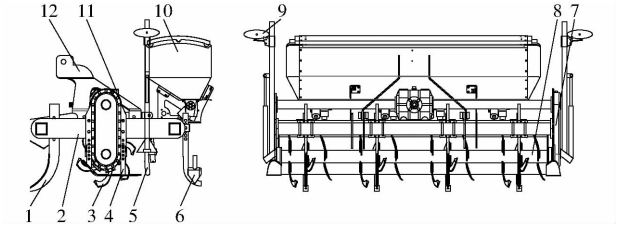


图 1 水田带状复式整地机结构简图
Fig. 1 Structure diagram of strip spacing multifunctional combined ground preparation machine in paddy field

1. 浅松部件 2. 机架总成 3. 多区段旋耕部件 4. 限深托板
5. 横置隔挡板 6. 开沟施肥铲 7. 传动箱 8. 防缠绕旋耕刀轴
9. 划印器 10. 肥箱总成 11. 传动系统 12. 三点悬挂总成

表 1 水田带状复式整地机主要参数
Tab. 1 Parameters of strip spacing multifunctional combined ground preparation machine in paddy field

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 590×2 480×1 250
浅松铲数	4
浅松铲间距/mm	600
浅松深度/mm	200~280
旋耕刀数	24
旋耕幅宽/mm	2 100
单条旋耕带宽/mm	300
旋耕深度/mm	120~160
肥铲数	4
施肥铲间距/mm	600
施肥深度/mm	80~120
配套动力/kW	≥66.18
机具行进速度/(km·h ⁻¹)	3.6~5.4
旋耕带数	4

1.2 工作原理

目前水田耕作多选用功率为 66.18~73.53 kW 的拖拉机配合相应机具完成作业,依据功耗要求并结合农业生产的实际情况,将水田带状复式整地机工作带设置为 4 条。如图 2 所示,工作时,等距固定在机架总成上的浅松铲首先对土壤进行浅松作业,

以达到加深耕作层、改善土壤的透水透气性能和团粒结构、降低旋耕阻力的目的;采用侧传动的方式,通过中间万向节、减速机构将动力传输至旋耕刀轴,由旋耕刀轴驱动多区段旋耕刀组完成土壤的苗床整地作业;施肥铲水平放置在浅松铲及旋耕刀组正后方,降低了其壅土和堵塞的可能性,施肥机构由调速电机变量驱动,可根据机具行进速度精准变量调节施肥量。整机作业后形成有利于水稻宽窄行栽植的下粗上细、上虚下实、透气性良好的土壤耕作条带,一次泡田后即可进行秧苗插秧作业。

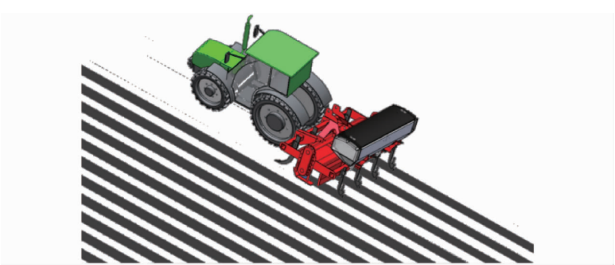


图2 水田带状复式整地机工作示意图
Fig.2 Working schematic of strip spacing multifunctional combined ground preparation machine in paddy field

1.3 耕作带宽设定

水稻宽窄行栽植模式,即窄行距与宽行距间隔插秧的水稻高产栽培模式,其利用水稻边际效应强的特点,增强水稻整体光能利用率,疏密有度,改变田间小气候,充分发挥了水稻个体与群体的增产潜力。经实际调查和查阅文献[22-23]可知,目前现有的水稻宽窄行栽植模式配置有3种株距要求,如表2所示。因此,将耕作带宽设定为300 mm,在300 mm的条带上完成两行水稻插秧,将相邻的区域作为免耕带,整机带状整地作业后秧苗栽植效果示意图如图3所示。

表2 水稻宽窄行株距配置

株距配置	宽行株距/mm	窄行株距/mm
A	450	150
B	400	200
C	350	250

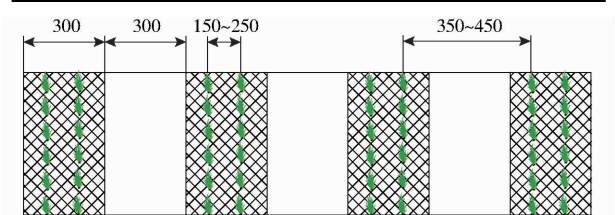


图3 带状整地作业后插秧示意图
Fig.3 Schematic of planting with tilling strips and wide and narrow rows of rice

2 关键部件设计

2.1 带状旋耕机构

带状旋耕机构由机架、传动系统、旋耕刀轴、多区段旋耕刀组等组成。带状旋耕机构采用横轴侧传动形式,拖拉机动力输出轴输出的动力,通过万向节总成传给减速器,再经传动机构将旋转动力传递给旋耕刀轴,旋耕刀轴上刀座设置采取间隔式排列,以配合多区段旋耕刀组完成带状旋耕作业。

2.1.1 旋耕机构运动与功耗

旋耕作业时,旋耕刀运动轨迹表现为旋耕刀的角速度和机组前进速度的合速度,如图4所示, x 正向为动力前进方向,垂直向下为 y 轴正向,以 O_{xy} 为投影面,旋耕机构正常工作时,刀具端点运动方程为

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) = R - h \end{cases} \tag{1}$$

式中 v_m ——机组前进速度,m/s
 R ——刀具回转半径,mm
 ω ——刀轴角速度,rad/s
 t ——时间,s
 h ——耕深,mm

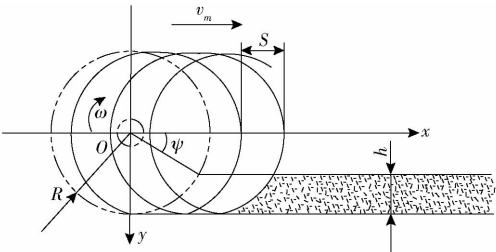


图4 旋耕刀运动轨迹
Fig.4 Rotary tiller structure movement track

为了使旋耕刀能够有效地切削土壤,旋耕刀端点运动轨迹为余摆线,即旋耕速比 λ 满足

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_m} > 1 \tag{2}$$

式(1)对时间 t 求导可得

$$\begin{cases} v_x = v_m - R\omega \sin(\omega t) \\ v_y = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

为满足向后抛土的条件,刀片绝对运动轨迹上任意一点绝对速度的水平分速 $v_x < 0$,得

$$v_m < (R - h) \omega \tag{4}$$

旋耕刀入土角为

$$\psi = \omega t = \arcsin \frac{R - h}{R} \tag{5}$$

式(5)代入式(3)可得

$$v_x = v_m - \psi \omega (R - h) \tag{6}$$

$$\psi = \frac{v_m - v_x}{\omega (R - h)} \tag{7}$$

安装在同一回转平面内的旋耕刀切削土壤时入土点的距离为旋耕机切土节距,已知切土节距 S 计算式为

$$S = v_m t \quad (8)$$

其中

$$t = \frac{2\pi}{Z\omega} \quad (9)$$

式中 Z ——同一安装平面内安装的刀片数

将式(9)代入式(8)可得

$$S = \frac{60v_m}{Zn} \quad (10)$$

由式(10)可知, Z 越大,旋耕机切土节距越小,但 Z 越大,旋耕机缠草堵土的情况越明显,根据本机的实际作业情况,设单个耕作条带同一安装平面内安装刀片数 Z 为 2,联立式(10)、(6)可得旋耕刀轴转速为

$$n_m = \frac{60v_m}{ZS} = 30 \frac{v_m - v_x}{\pi(R - h)} \quad (11)$$

由式(11)可得除切土节距 S 和旋耕深度 h 外,带状旋耕机构的主要运动参数为行进速度 v_m 与刀轴转速 n_m 。设计耕深 h 为 12 ~ 16 cm,旋耕刀回转半径 R 为 250 mm,机具行进速度 v_m 取 0.5 ~ 1.5 m/s (3.6 ~ 5.4 km/h) 代入式(11)计算得旋耕刀转速 n_m 为 220 ~ 260 r/min,此时旋耕速比 λ 最小值为 5.75,满足作业条件。

旋耕机构的功耗主要由旋耕机构传动部分、克服作用于土壤水平反力、切削土壤和抛掷土堡所耗功率组成,旋耕装置消耗总功率为

$$N = N_q + N_p + N_n + N_f \quad (12)$$

式中 N_q ——切削土壤消耗的功率, kW

N_p ——抛掷土堡消耗的功率, kW

N_n ——克服土壤水平反力消耗的功率, kW

N_f ——传动装置消耗的功率, kW

其中, N_n 是土壤沿机组前进方向作用于刀轴上的反力所消耗的功率。本机为正转旋耕,故功率 N_n 有助于帮助推动机组前进,可取代部分机具前进所需功率,因此取负号。

旋耕刀随机组前进的同时绕刀轴做圆周运动耕耘土壤,切土和抛土发生在同一过程中,旋耕机切土功率为

$$N_q = \frac{1}{75} A_q B v_m \quad (13)$$

式中 A_q ——切削土壤比功, N/cm²

B ——旋耕幅宽, mm

土粒在旋耕刀作用下的运动十分复杂,旋耕刀的形状和尺寸、在刀轴上的排列方式、土壤条件以及垡块尺寸和形状都对土粒的运动方向和速度有影

响,旋耕机抛土功率计算式为

$$N_p = \frac{1}{75} A_p h B v_m \omega^2 R^2 \quad (14)$$

式中 A_p ——抛掷土壤比功, N/cm²

旋耕刀轴受力如图 5 所示,克服土壤水平反力消耗功率 N_n 为旋耕机克服土壤沿水平方向作用于刀轴上的反力所消耗的功率。

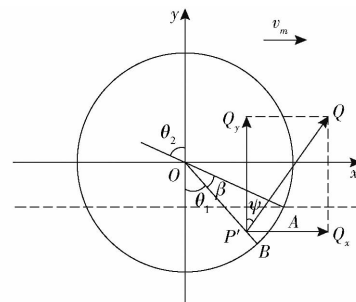


图 5 刀轴受力分析

Fig. 5 Stress analysis of cutter shaft

设土壤作用于刀轴上的平均阻力 Q ,在刀轴上均匀分布, m 为刀轴阻扭矩,它由相继入土的各单刀阻扭矩合成。旋耕刀端点以回转半径 r 切土时,其阻力合力的作用半径 $r' = 0.9r$,则 $Q = m/r'$,以刀轴中心 O 为圆心、旋耕刀最大回转半径为半径作圆,未耕地表水平线与圆周交于点 A ,此时旋耕刀入土角为 ψ 。相对于半径线 OA ,作交角为切削角 β ($\beta < 0$) 的半径线 OB ,在 OB 上 0.9 r 处确定点 P' ,设力 Q 作用点位于点 P' ,由图 5 分析可得

$$\begin{cases} \theta_2 = 90^\circ - \psi = \theta_1 + \beta \\ Q_y = Q \sin \theta_2 \\ Q_x = Q \cos \theta_1 = Q \cos (90^\circ - \psi - \beta) \end{cases} \quad (15)$$

则旋耕机构克服土壤水平反力消耗功率 N_n 计算式为

$$N_n = Q_x v_m \quad (16)$$

此部分功耗和旋耕刀排列方式密不可分,若旋耕刀采用单一螺旋线排列,一定程度增大其水平侧向力,增大 N_n 。本机旋耕机构由于旋耕刀采用了多区段排列,降低了旋耕机构的侧向输土,故也将单向螺旋排列纳入考虑范畴。

旋耕机传动部分损耗功率 N_f 为

$$N_f = (1 - \eta) (N_q + N_p + N_n) \quad (17)$$

式中 η ——传动效率

综上所述,旋耕机机构功率消耗 N 为

$$N = (2 - \eta) \left(\frac{1}{75} A_q H B v_m + \frac{1}{75} A_p H B v_m \omega^2 R^2 + Q_x v_m \right) \quad (18)$$

由式(18)可知,机具行进速度、旋耕刀轴转速、旋耕刀片的设计及旋耕刀片在刀轴上排列方式都会

对旋耕机构的功耗产生重要影响。

2.1.2 旋耕刀设计

旋耕刀采用专利技术(CN202023237966.7)的打浆、旋耕通用刀片,刀片既可与本文机具结合完成对土壤及前茬秸秆的切削旋耕作业,同时也可配合相应机具完成水田苗床的耙浆平地作业。因此旋耕刀刃口不仅要有适当滑切角,以实现适度滑切功能;同时需有相应的正切面^[24],方便打浆作业时,获得更好的泥土碎化搅浆效果。

当旋耕机转速和前进速度一定时,旋耕刀侧切刃上各点在地表时的动态滑切角是整个切削过程中该点处的最小值^[25],故计算出旋耕刀侧切刃口线上各点的静态滑切角和该点在地面位置处的动态滑切角,便可知侧切刃口上该点在整个切削过程中的动态滑切角波动区间。如图6所示,旋耕刀刃口曲线包含两部分:直线刃口MN和圆弧刃口NPQ,耕作过程中圆弧刃口先与地面接触,旋耕刀圆弧刃口上各点在固定坐标系Oxy中的运动方程为

$$\begin{cases} x = r\cos(\delta - \omega t) + L\cos(\omega t) + \frac{R}{\lambda}\omega t \\ y = r\sin(\delta - \omega t) - L\sin(\omega t) \end{cases} \quad (19)$$

式中 δ ——圆弧刀刃NPQ对应角
 L ——刀轴轴线与旋耕刀刃口圆弧线圆心间距,mm

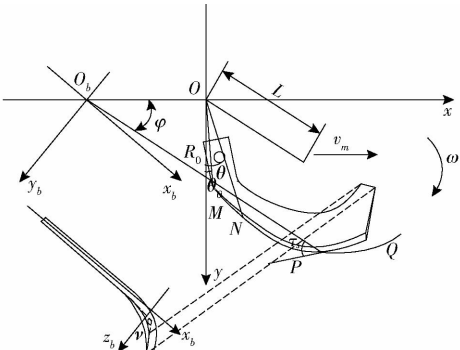


图6 旋耕刀结构图
Fig.6 Structure drawing of rotary tiller

静态滑切角 ϕ_s 计算式为

$$\phi_s = \arccos \frac{-L\sin\delta}{\sqrt{r^2 + L^2 + 2rL\sin\delta}} \quad (20)$$

依据实际旋耕刀作业情况,将式(20)中 δ 取值为 $-108.53^\circ \sim -50.67^\circ$ 。式(19)对时间 t 求导可得任意时刻旋耕刀刃口上各点的速度为

$$\begin{cases} v_x = r\omega\cos(\delta - \omega t) + L\omega\cos(\omega t) + \frac{R}{\lambda}\omega \\ v_y = r\omega\sin(\delta - \omega t) - L\omega\sin(\omega t) \end{cases} \quad (21)$$

联立式(20)与式(19),可以求出任意时刻旋耕刀圆弧上各点的动态滑切角 ϕ_d 为

$$\phi_d = \arcsin \frac{\left| r + L\cos\delta + \frac{R}{\lambda}\sin(\delta - \omega t) \right|}{\sqrt{r^2 + L^2 + \frac{R^2}{\lambda^2} + 2L\left(r\cos\delta - \frac{R}{\lambda}\sin\omega t\right) + 2\frac{R}{\lambda}r\sin(\delta - \omega t)}} \quad (22)$$

联立式(22)与式(21),求出刃口圆弧上不同点接触地面的时间为

$$t = \left(\arcsin \frac{r\sin\delta}{\sqrt{r^2 + L^2 + 2Lr\cos\delta}} + \arcsin \frac{110}{\sqrt{r^2 + L^2 + 2Lr\cos\delta}} + 2\pi \right) / \omega \quad (23)$$

由式(22)、(23)求出角 δ 在 $[-108.53^\circ, -50.67^\circ]$ 时刃口曲线上各点处接触地面时刻的动态滑切角 ϕ_d ,利用 Matlab 计算出圆弧刃口上各监测点达到竖直位置的动态滑切角与静态滑切角相同,分别为 30.357° (最高位置)和 62.329° (最低位置),证明了所设计旋耕刀片的圆弧刃口滑切角正确,其动态滑切角为 $[30.357^\circ, 62.329^\circ]$,此时刀片圆弧刃口的滑切效果良好,同时满足水田打浆刀的滑切角条件^[26]。

旋耕刀作业耗能主要受侧切刃与正切刀刃口曲线影响。为使旋耕刀作业功耗更低^[27],侧切刃设计为平面曲线,采用等进螺旋线,在坐标系Oxy中,曲线参数方程为

$$\begin{cases} x = r_0\cos\theta_0 + r_1\cos\theta \\ y = r_0\sin\theta_0 + r_1\sin\theta \end{cases} \quad (24)$$

式中 r_0 ——螺旋线起点极径,mm
 θ_0 ——螺线起点极角, ($^\circ$)
 r_1 ——螺旋极角每增加1rad极径增量,mm
 θ ——螺线上任意点与起点夹角, ($^\circ$)

在确保旋耕作业质量的前提下,保证旋耕刀在打浆作业过程中具有可观的翻土和搅浆的效果,相对于侧切刃,旋耕刀正切刃设计为空间曲线,坐标系为 $O_bx_by_bz_b$,采用偏心圆曲线设计^[28],其曲线方程为

$$\begin{cases} x_b = (R_0 - e)\cos\varphi \\ y_b = (R_0 - e)\sin\varphi \\ z_b = R_0\cos\tau_s\tan(\pi - \nu) \end{cases} \quad (25)$$

式中 e ——偏心距,mm
 R_0 ——偏心圆半径,mm
 φ ——刃口曲线极角, ($^\circ$)
 τ_s ——正切刃静态滑切角, ($^\circ$)
 ν ——正切面与侧切面弯折角, ($^\circ$)

其线型如图6所示,由式(25)可以看出,刃口曲线坐标与弯折角 ν 有关,弯折角不同,刃口曲线形状也不同,从而旋耕刀轮廓、质量也不同。根据刀具

加工工艺要求,将弯折角定为 $90^{\circ} \sim 150^{\circ}$,将旋耕刀应力作为约束条件,旋耕刀采用硼钢制成,考虑到刀具形状对材料强度的影响,硼钢属塑性材料,选取强度安全系数 $n_0 = 1.5$,经计算旋耕刀许用应力极限为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n_0} \tag{26}$$

式中 σ_b ——强度极限, $\text{N} \cdot \text{m}$

计算得许用应力极限为 $2.81 \times 10^8 \text{ Pa}$,根据本机旋耕刀已有研究结果,运用 Matlab 软件编制基于蜂群算法优化计算程序,解出式(24)~(26)未知参数最优值,通过计算得侧切刃起点极径 r_0 为 171 mm、起点极角 θ 为 23.5° 、极角每增加 1 rad 极径增量 r_1 为 25 mm、侧切刃偏心距 e 为 26.3 mm、偏心圆半径 R_0 为 280 mm、弯折角 ν 为 103° ,结合本机旋耕刀实际作业情况,进一步确定其参数,其中单刀作业幅宽 L_0 为 50 mm、正切面刃角 γ 为 12° 。此时旋耕刀旋耕作业功耗低,碎土效果好;打浆作业时,搅浆作业质量高。

2.1.3 旋耕刀轴参数设计

带状旋耕机构工作时每把刀片相间入土,承受弯曲、扭转复合载荷作用。就受弯而言,刀轴的力学模型可简化为一受若干集中载荷作用的简支梁,如图 7 所示。由于本机带状旋耕机构共有 4 条耕作带,为简化运算,将每条带宽上的旋耕刀组视为整体,故本文 n 最大为 4,集中载荷的位置和角度由刀片的排列方式确定,刀轴任意截面处弯矩为

$$M(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{L-L_i}{L} P_i x & (0 \leq x \leq L_1) \\ \sum_{i=1}^n \frac{L-L_i}{L} P_i x - \sum_{i=1}^{i'} P_i (x-L_i) & (x \geq L_{i'}, i' = 1, 2, 3, 4) \end{cases} \tag{27}$$

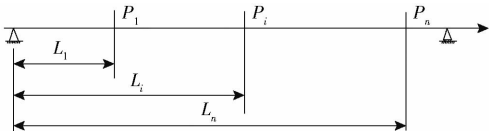


图 7 刀轴的力学模型

Fig. 7 Mechanical model of tool shaft

根据此弯矩方程再结合刀片排列方式便可推出刀轴部危险截面。由第四强度理论可得刀轴的最大工作应力为

$$\sigma_0 = \frac{1}{W} \sqrt{M^2 + 0.75 M_n^2} \tag{28}$$

式中 W ——刀轴抗弯截面系数

M ——刀轴危险截面处弯矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

M_n ——刀轴危险截面处扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

刀轴一般为空心轴,当长度一定时,设计刀轴就

是确定刀轴的断面尺寸,为使旋耕刀轴结构与经济性最优,以质量最轻(用料最少)作为刀轴的优化目标,建立目标函数

$$\min F(x) = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \tag{29}$$

式中 D ——刀轴外径, mm

d ——刀轴内径, mm

旋耕刀轴强度条件为

$$g_1(x) = [\sigma_0] - \frac{32D}{\pi(D^4 - d^4)} \sqrt{M^2 + 0.75 M_n^2} \tag{30}$$

式中 $[\sigma_0]$ ——刀轴的许用应力, MPa

根据弹性约束理论,对长度相同的薄壁圆杆,半径越大,壁厚越小,扭转稳定性则越差,为此旋耕刀轴扭转失稳约束为

$$g_2(x) = 0.292E \sqrt[3]{\frac{D-d}{D}} - \frac{M_{nm}}{W} \geq 0 \tag{31}$$

式中 M_{nm} ——最大工作扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

E ——刀轴材料的弹性模量, MPa

基于上文优化算法程序对刀轴的参数进行优化,刀轴长度为 2 345 mm,最大工作扭矩为 $300 \text{ N} \cdot \text{m}$,最大危险截面弯矩 $126 \text{ N} \cdot \text{m}$ (旋耕刀不同排列方式中最大值), $[\sigma_0]$ 取值为 100 MPa,此时刀轴的外径为 80 mm,壁厚为 10 mm。

为保证耕作带宽为 300 mm,且不漏耕,单条旋耕带刀座间距 G 应满足

$$G = 2b \tag{32}$$

式中 b ——单刀作业幅宽, mm

每条旋耕带有 3 列刀组,依据前文设计旋耕刀作业幅宽并综合考虑后期旋耕刀排列方式,将刀座间距 G 确定为 100 mm。如图 8 所示,将刀座设计为多区段形式,配合旋耕刀完成带状旋耕作业,也可将其视作等距为 300 mm 的 4 组全幅旋耕作业,作用为将上层土壤进行土层交换、碎土和混合作业,将秸秆、杂草切断混合,为栽植苗床作准备。依据文献[29]理论分析中选定耕深 h 为 120~160 mm。

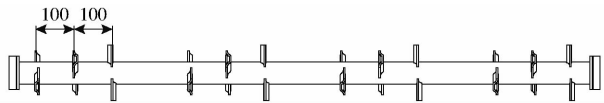


图 8 间隔式排列刀座

Fig. 8 Spaced knife holder

2.2 浅松机构与施肥机构作业深度

浅松机构主要由机架、浅松铲及紧固件组成,这部分设计目的是加深耕作层、改善土壤的透水透气性能,为后续旋耕作业减少阻力。浅松作业^[30]与深松作业相似,但浅松作业阻力较小、土壤扰动量较少,参考国家标准 JB/T 10295—2001,深松作业的深

度需大于 25 cm,而水稻在分蘖期和成熟期,约 90% 的根系分布在 20 cm 深度^[31-32],意味着在 25 cm 以下的营养元素很难被水稻吸收,由此可见浅松作业更适合水稻。

而在水田条件的浅松作业下,耕作阻力与浅松深度二阶函数关系^[33]为

$$F=0.009\,4H_1^2-0.16H_1+1.503\,9\quad(33)$$

式中 F ——耕作阻力,N

H_1 ——浅松深度,mm

由式(33)可得,浅松铲对土壤的扰动程度随着耕作深度的变化而变化,整体呈先增大后减小的趋势。在土层深度 20 cm 内,随着耕作深度的增加,土壤扰动量逐渐增加,破碎体尺度增大,当耕深超过 20 cm 后,土壤扰动量变少,综合考虑浅松铲扰动深度以及机具输出的动力分配,将浅松作业深度定为 20 ~ 25 cm。

整机作业在水稻移栽前,故施入土壤的肥料为基肥。基肥一般是颗粒状复合肥,球形率较高,流动性好。因此选择电动外槽轮式排肥器作为主要排肥装置,与肥箱、排肥器、肥铲、肥管等共同组成带状施肥机构。电动外槽轮式排肥器由车载 12 V 蓄电池提供驱动力,经肥管和肥铲将肥料输送至土层内。水泡田后基肥溶解,有利于插秧后秧苗发根好、返青快、早分蘖。相比于水泡田后的全面撒施,带状施肥更集中,肥料利用率也更高,达到既满足有效分蘖期内有较高的速效养分供应,又保证肥效稳长的效果。参考已有研究成果^[34-35],水稻基肥一般施肥深度应在 12 cm 之下,使铵在少氧的环境中保持稳定、防止流失;同时水稻分蘖期和成熟期,60% ~ 70% 根系分布在 10 cm 的横向范围内。综合考量肥料的利用率,设计施肥水平位置在窄行水稻之间,肥铲间距为 60 cm,与浅松铲前后保持一致,深度为 10 ~ 13 cm。

3 带状旋耕机构仿真优化分析

水田土壤是一种具有特殊内部黏结特性,且具有离散特点的特殊物质。由于土壤具有离散属性,故采用离散元分析方法作为分析手段,以此模拟土壤和机械相互作用^[36-37]。采用 EDEM 离散元分析软件,通过正交旋转组合试验对设计的带状联合整地机在田间工作情况进行模拟,分析带状旋耕机构作业前进速度、旋耕刀轴转速、旋耕刀排列方式 3 个试验因素对耕后碎土率、地表平整度 2 个仿真指标的影响,从而考察机器设计的合理性。在此基础上,运用 ANSYS 软件对带状旋耕机构进行模态分析,为后续田间试验做准备。

3.1 土壤模型创建

土壤颗粒形状多样,土粒间力学关系复杂,为了更加真实地还原真实土壤特性,在创建土壤颗粒模型时考虑同一田块土壤特性一致。根据试验基地土壤实际情况,设置土壤粒径小于 40 mm,土壤容重 1.54 g/cm³、含水率 13.17%、紧实度 3 664.13 kPa,并且在田间符合正态分布,为了模拟土壤颗粒的不规则性,土壤颗粒设计为不规则团球状;土壤基本参数为:密度 1 400 ~ 1 600 kg/m³、剪切模量 $2.0 \times 10^7 \sim 2.5 \times 10^7$ Pa、泊松比 0.35,土壤颗粒间内力以键的形式表示,即在软件中设置颗粒之间以 Hertz - Mindlin with bonding 方式黏结,临界法向刚度 0 ~ 200 N/m,临界切向应力 0 ~ 150 Pa^[38-39]。

3.2 试验方法

在保证仿真连续性的前提下,设定固定时间步长 8.58×10^{-6} s,为 Rayleigh 时间步长的 20%,机器田间作业时间为 12 s,网格单元尺寸为 6 mm,为最小颗粒半径的 3 倍,同时设计耕深为 150 mm。结合 Design-Expert 8.0.6,进行带状旋耕机构仿真试验。参照 NY/T 499—2002《旋耕机作业质量》,选取耕后碎土率、地表平整度为评价指标。

3.2.1 碎土率

碎土率可由颗粒接触模型中粘结键断裂系数表示。运用 EDEM 后处理收集试验数据,得出离散元土壤颗粒间粘结键断裂数量。碎土率计算公式为

$$d'=\frac{N_1}{N_2}\times 100\%\quad(34)$$

式中 d' ——碎土率,%

N_1 ——作业区域断裂粘结键土壤颗粒数

N_2 ——作业区域土壤颗粒总数

3.2.2 地表平整度

地表平整度越高,一定程度上可以节约大量水泡田用水,所以地表平整度作参考指标有重要意义。根据地表平整度考察标准,利用 EDEM 软件截断功能(Clipping 模块)沿垂直于带状旋耕机构前进方向,对仿真土槽进行区域划分,提取该区域带状旋耕机构作业前、后地表颗粒稳定后的坐标值,将坐标值导入 CAD 中,绘制出旋耕前地表线和作业后地表线。在整个带状机构旋耕宽度范围做等分标记测点,地表平整度计算式为

$$S_k=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_k}(a_{kj}-a_k)^2}{n_k-1}}\quad(35)$$

式中 a_k ——第 k 次测量的浅松前、后地表至水平基准线的垂直距离,mm

a_{kj} ——第 k 次测量中第 j 个等分点的浅松

前、后地表至水平基准线的垂直距离,mm

n_k ——第 k 次测量中的测试点数
 S_k ——第 k 次测量的地表平整度,mm

3.3 正交旋转试验设计

采用三因素三水平正交旋转组合试验方法^[40],参考上文及旋耕机构已有的研究成果^[41],机具行进速度及旋耕刀轴转速为影响旋耕机作业质量与功耗的重要因素,同时由于多区段旋耕刀组同时作业,每组的旋耕刀在刀轴上的排列方式是影响旋耕机作业质量、机具振动及功耗的重要因素。故以机具行进速度、旋耕刀轴转速、带状旋耕刀片排列方式为试验因素,以碎土率、地表平整度为评价指标,选用 $L(3^4)$ 正交表,共实施 17 组试验,仿真模拟过程如图 9 所示。

试验因素编码如表 3 所示。旋耕刀排列方式因素水平为 -1(多区段对称单螺旋排列)、0(多区段

对称双螺旋排列)、1(多区段单向螺旋排列),如图 10 所示。

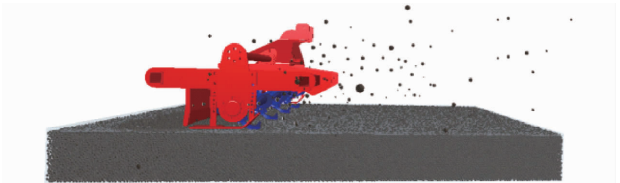


图 9 水田带状旋耕机构 EDEM 仿真过程
Fig.9 EDEM simulation process of strip multifunctional combined ground preparation machine in paddy field

表 3 试验因素编码
Tab.3 Test factors and codes

编码	因素		
	机具行进速度/ (km·h ⁻¹)	旋耕刀轴转速/ (r·min ⁻¹)	旋耕刀片排列 方式
-1	1.8	220	-1
0	3.6	240	0
1	5.4	260	1

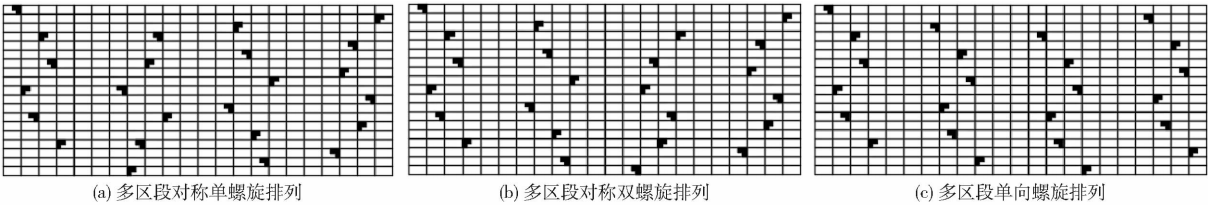


图 10 多区段旋耕刀排列方式
Fig.10 Rotation knife arrangement

3.4 试验结果与分析

试验结果如表 4 所示,A、B、C 为因素编码值,方差分析如表 5、6 所示。

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Experiment layout and results

序号	因素			试验指标	
	机具行进速度 A	旋耕刀轴转速 B	旋耕刀排列方式 C	碎土率/%	地表平整度/mm
1	-1	1	0	93.69	18.3
2	0	-1	1	89.97	25.9
3	0	-1	-1	88.56	26.7
4	0	0	0	95.93	17.5
5	1	0	-1	88.79	26.9
6	-1	0	-1	91.23	23.5
7	0	0	0	95.47	17.3
8	0	1	1	89.43	25.3
9	0	0	0	94.99	17.4
10	0	0	0	95.33	17.3
11	1	1	0	90.53	24.1
12	-1	0	1	92.54	18.1
13	0	1	-1	88.69	26.8
14	1	0	1	90.11	19.7
15	1	-1	0	90.89	19.3
16	0	0	0	95.49	17.3
17	-1	-1	0	93.79	18.2

3.4.1 碎土率回归模型的建立与显著性检验

通过对试验数据的分析和多元回归拟合,碎土

率 Y_1 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,对于碎土率 Y_1 ,各因素及因素之间的交互作用影响的主次顺序是 C^2 、 B^2 、 A 、 A^2 、 C 、 AC 、 BC 、 B 、 AB ,其中 C^2 、 B^2 、 A^2 、 C 和 A 对碎土率 Y_1 的影响极显著 ($P < 0.01$); B 、 AC 、 BC 碎土率 Y_1 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)。将不显著交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项后,再进行方差分析,如表 5 所示,得到各因素对碎土率 Y_1 回归方程为

$$Y_1 = 95.44 - 1.37A - 0.11B + 0.6C + 2.5 \times 10^{-3}AC - 0.18BC - 0.86A^2 - 2.36B^2 - 3.92C^2$$

(36)

3.4.2 地表平整度回归模型的建立与显著性检验

通过对试验数据的分析和多元回归拟合,地表平整度 Y_2 方差分析如表 6 所示。由表 6 可知,对于地表平整度 Y_2 ,各因素及因素之间的交互作用影响的主次顺序是 C^2 、 B^2 、 C 、 BC 、 A 、 B 、 AB 、 AC 、 A^2 ,其中 C^2 和 B^2 对地表平整度 Y_2 的影响极显著 ($P < 0.01$); A 、 B 、 C 、 AB 和 BC 对地表平整度 Y_2 的影响显著 ($0.01 < P < 0.05$)。将不显著交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项后,再进行方差分析,如表 6 所示,得到各因素对地表平整度 Y_2 回归方程为

表 5 碎土率 Y_1 方差分析

Tab.5 Variance analysis of broken soil rate Y_1

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	116.64/116.62	9/8	12.96/14.58	136.58/155.19	<0.000 1/ <0.000 1
A	14.93/14.93	1/1	14.93/14.93	157.38/179.66	<0.000 1/ <0.000 1
B	0.095/0.095	1/1	0.095	1/1.41	0.035 1/0.317 3
C	2.86/2.86	1/1	2.86/2.86	30.1/34.36	0.000 9/0.000 5
AB	0.017	1	0.017	0.18	0.068 5
AC	$2.5 \times 10^{-5}/2.5 \times 10^{-5}$	1/1	$2.5 \times 10^{-5}/2.5 \times 10^{-5}$	$2.64 \times 10^{-4}/3.01 \times 10^{-4}$	0.029 8/0.024 1
BC	0.11/0.11	1/1	0.11/0.11	1.18/1.35	0.031 2/0.025 3
A^2	3.09/3.09	1/1	3.09/3.09	32.51/37.11	0.000 7/0.003
B^2	23.47/23.69	1/1	23.47/23.69	247.36/282.37	<0.000 1/ <0.000 1
C^2	64.55/65.19	1/1	64.55/65.19	681.35/777.80	<0.000 1/ <0.000 1
残差	0.21/0.227	3/4	0.069/0.053	0.60/0.45	0.6483/0.7906
	0.46/0.46	4/4	0.11/0.11		
总和	117.30/117.30	16/16			

注：斜线后面为剔除不显著因素后结果。

表 6 地表平整度 Y_2 方差分析

Tab.6 Variance analysis of surface flatness coefficient Y_2

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	235.91/239.12	9/7	23.21/29.78	10.55/13.19	0.002 6/0.001 9
A	17.70/17.70	1/1	17.70/17.70	7.13/6.94	0.032 0/0.029 5
B	2.42/2.42	1/1	2.42/2.42	0.97/0.94	0.035 6/0.031 2
C	27.75/27.75	1/1	27.75/27.75	11.17/10.88	0.012 4/0.010 3
AB	5.52/5.52	1/1	5.52/5.52	2.22/2.16	0.037 9/0.031 7
AC	0.81	1	0.81	0.33	0.185 8
BC	0.12/0.12	1/1	0.12/0.12	0.049/0.048	0.028 3/0.021 9
A^2	2.40	1	2.40	0.97	0.358 4
B^2	47.82/47.82	1/1	47.82/47.82	19.25/18.74	0.003 2/0.001 9
C^2	124.83/124.83	1/1	124.83/124.83	50.25/48.93	0.000 2/0.000 1
残差	17.39/20.6	3/5	0.095/0.080	2.74/2.31	0.196 3/0.239 4
	17.36/17.36	4/4	5.79/5.79		
总和	253.30/253.30	16/16			

$Y_2 = 17.33 + 1.49A + 0.55B - 1.86C + 1.17AB -$

$0.17BC + 3.38B^2 + 5.46C^2$

(37)

3.4.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 统计软件对试验数据进行处理,得出机具行进速度 A 、旋耕刀轴转速 B 、旋耕刀排列方式 C 之间显著和较显著交互作用对碎土率 Y_1 及地表平整度 Y_2 2 个指标影响的响应曲面,如图 11 所示。

如图 11a 所示,当旋耕刀轴转速一定时,碎土率 Y_1 随着机具行进速度增加呈减小趋势,最优机具行进速度为 1.8 ~ 4.2 km/h,原因是当机具行进速度较低时,旋耕刀轴能充分切削土壤,而机具行进速度较高时,部分土壤未能充分破碎就被抛出,导致碎土率降低;如图 11b 所示,当机具行进速度为 3.6 km/h 时,碎土率 Y_1 随着旋耕刀排列方式的改变呈先增加后减小的趋势,最优的旋耕刀排列方式为多区段对

称双螺旋排列,原因是这种旋耕刀排列方式,使旋耕刀对土壤切削最均匀彻底,稳定性好,最佳刀轴转速为 230 ~ 250 r/min,此时碎土率 Y_1 随着旋耕刀轴转速的增加呈先增加后减小的趋势,原因是当刀轴转速较高时,旋耕刀对根茬呈滑移切削状态,土壤切割不完全,导致碎土率降低;在机具行进速度与旋耕刀排列方式的交互作用中,主要影响碎土率 Y_1 的因素是带状旋耕机构行进速度。

如图 11c 所示,当旋耕刀轴转速一定时,地表平整度系数 Y_2 随着机具行进速度的增加呈增加的趋势,最优的机具行进速度为 3.6 ~ 5.4 km/h,主要原因是行进速度高的时候,更不易出现壅土现象,土壤分布均匀;当机具行进速度为 3.6 km/h 时,地表平整度系数 Y_2 随着旋耕刀轴转速增加呈先减小后增加的趋势,如图 11d 所示,最优的旋耕刀轴转速为 220 ~ 240 r/min,原因是旋耕刀轴转速较小时,土壤

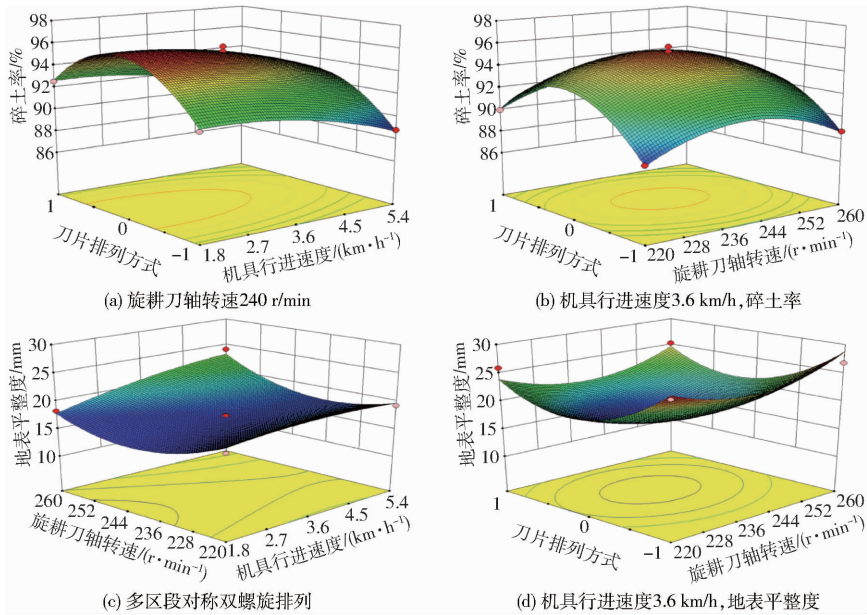


图 11 带状旋耕机构试验响应曲面
Fig. 11 Response surface of prototype test

不能完全破碎,导致地表大土块较多,平整度较低;当旋耕刀轴转速过大时,土壤易被翻起,导致土壤分布不均,地表平整度同样不高,在机具前进速度与旋耕刀轴转速的交互作用中,主要影响地表平整度 Y_2 的因素是旋耕刀轴转速。

对带状旋耕机构进行参数优化,以获取最优的参数组合,最大程度提高带状旋耕机构地表平整度及碎土率的稳定性。通过对图 11 中 4 个响应曲面的分析,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对回归模型进行求解,根据实际工作条件及上述相关模型分析,结果为:机具行进速度为 3.6 km/h、刀轴转速为 240 r/min、旋耕刀排列方式为多区段对称双螺旋排列,此时理论机具碎土率为 93.26%,地表平整度为 17.3 mm。

4 田间试验

为了验证仿真得到的较优组合的准确性,进行了水田带状复式整地机整机田间试验。试验以碎土率、地表平整度、旋耕带宽稳定性系数作为主要指标,耕深、耕深稳定性系数、浅松深度、浅松深度稳定性系数为参考,综合评价水田带状复式整地机工作性能及耕作效果。

4.1 试验条件

田间试验于 2020 年 5 月 21 日在东北农业大学阿城试验基地(126°59'E、49°32'N)进行。试验设备主要包括约翰迪尔 904 型拖拉机、水田带状复式整地机、环刀、土壤盒、电热恒温干燥箱、卷尺、钢尺、电子秤等。测量测试区深度 0 ~ 300 mm 土壤容重为 1.54 g/cm³、含水率 13.17%、紧实度 3 664.13 kPa,试

验区前茬作物为水稻。

4.2 试验方法

选取地势平坦、长度为 200 m、宽度为 50 m 的试验地块,设定中间 100 m 为工作平稳区,试验区宽度作为测量区域。测量采用 5 点取样法,测量点选取平行四边形对角线均分点。机具平均行进速度为 3.6 km/h、旋耕转速为 240 r/min、旋耕深度为 150 mm、浅松深度为 230 mm。机具性能指标和试验方法依据文献[42]及 GB/T 24675.1—2009《保护性耕作机械 浅松机》,试验主要指标有:碎土率、地表平整度;参考指标:旋耕深度、旋耕深度稳定性系数、浅松深度、浅松深度稳定性系数。而实际作业中,耕宽稳定性系数同样是影响作业质量的重要因素,本文机具为带状旋耕,故将耕作带宽稳定性系数也作为主要评价指标之一。

碎土率与地表平整度测定方式参考上文,耕作带宽稳定性系数测定方法:沿垂直机组运动方向每隔 2 m 左、右测定 2 个相邻行程耕作带沟墙之间的水平距离即为耕作带宽,每个行程测量 5 组数,共测 3 个行程。耕作带宽稳定性系数计算式为

$$U = 1 - V \tag{38}$$

其中
$$V = \frac{S_d}{a} \times 100\% \tag{39}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (a_j - a)^2}{N}} \tag{40}$$

$$a = \frac{\sum_{j=1}^N a_j}{N} \tag{41}$$

式中 a_j ——第 j 个行程的旋耕带宽平均值,mm
 U ——耕作带宽稳定性系数,%
 a ——耕作带宽平均值,mm
 N ——行程数
 S_d ——耕作带宽标准差,mm
 V ——耕作带宽变异系数,%

4.3 试验结果与分析

水田带状复式整地机试验现场如图 12 所示。各性能指标均为行程结果的平均值,水田带状复式整地机试验结果如表 7、8 所示。田间耕深和浅松深度测定如图 13 所示,碎土率和耕作带宽测定如图 14 所示。



图 12 水田带状复式整地机田间试验

Fig. 12 Field experiment of strip spacing multifunctional combined ground preparation machine in paddy field

表 7 性能试验结果

Tab. 7 Results of performance experiment mm				
试验组号	旋耕深度	浅松深度	耕作带宽	地表平整度
1	151	223	302	18
2	155	217	304	17
3	147	226	307	19
4	149	220	295	18
5	153	219	303	19
6	150	221	301	15
7	151	225	297	17
8	153	218	300	16
9	154	220	298	15
10	155	221	302	17
11	148	224	300	18
12	153	223	299	19
13	150	219	305	21
14	147	220	301	15
15	154	225	300	17

由表 8 可知,水田带状复式整地机作业后,旋耕深度、浅松深度、地表平整度、单条耕作带宽、耕作带宽稳定性系数、碎土率、耕深稳定性系数、浅松深度稳定性系数分别为 151.3、221.4、18.4、300.9 mm、95.3%、92.97%、93.5%、92.3%,满足农艺要求,即机器一次作业后形成有利于水稻宽窄行栽植的下粗上细、上虚下实、透气性良好的土壤耕作条带,一次泡田后即可进行秧苗插秧作业。

表 8 性能参数结果

Tab. 8 Calculation results of performance test		
参数	水田带状复式 整地机试验结果	行业标准
旋耕深度/mm	151.3	≥80
旋耕深度稳定性系数/%	93.5	≥90
单条旋耕带宽/mm	300.9	
旋耕带宽稳定性系数/%	95.3	
浅松深度/mm	221.4	≥150
浅松深度稳定性系数/%	92.3	≥90
碎土率/%	92.97	≥80
地表平整度/mm	18.4	≤40



图 13 田间试验耕深及浅松深度测定

Fig. 13 Field experiment for further determination



图 14 田间试验碎土率和耕作带宽测定

Fig. 14 Determination of soil fragmentation rate in field experiment

水田带状复式整地机试验结果中,碎土率与地表平整度试验结果与 EDEM 仿真结果基本一致,说明机器虚拟仿真的正确性与可行性。

5 结论

(1) 针对水稻宽窄行栽培模式的整地及施肥需要,设计一种水田带状复式整地机,一次作业可完成浅松、带状旋耕整地、精准施肥、苗床平整作业。单条耕作带宽为 300 mm,间隔 300 mm 为免耕带,可满足 15~45 cm、20~40 cm、25~35 cm 行距的水稻宽窄行插秧技术要求。

(2) 根据田间作业的实际情况,利用 EDEM 软件对水田带状复式整地机的带状旋耕机构进行田间作业虚拟仿真分析,通过正交旋转组合试验的参数优化,确定最佳工作速度为 3.6 km/h、刀轴转速为 240 r/min、旋耕刀排列方式为多区段对称双螺旋排列,此时碎土率为 93.26%,地表平整度为 17.3 mm。

(3) 田间试验表明:水田带状复式整地机旋耕深度、浅松深度、地表平整度、单条耕作带宽、耕作带

宽稳定性系数、碎土率、耕深稳定性系数、浅松深度稳定性系数分别为 151.3、221.4、18.4、300.9 mm、95.3%、92.97%、93.5%、92.3%，满足水稻苗床整地需求，并且有较高的作业质量，对比全幅整地机具，水田带状复式整地机更符合少、免耕保护性耕作的需要。

参 考 文 献

[1] 王琳, 臧英, 罗锡文. 我国水稻生产机械化发展对策[J]. 农机化研究, 2009,31(6):1-4.
WANG Lin, ZANG Ying, LUO Xiwen. Development countermeasure of rice production mechanization in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(6):1-4. (in Chinese)

[2] 李泽华, 马旭, 李秀昊, 等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018,49(5):1-20.
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(5):1-20. (in Chinese)

[3] QUN H, JIANG W, SHI Q, et al. Effect of wide-narrow row arrangement in mechanical pot-seedling transplanting and plant density on yield formation and grain quality of japonica rice[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020,19(5):1197-1214.

[4] 高福强, 张绍权. 水稻宽窄行栽培技术的研究与推广应用[J]. 中国稻米, 2018,24(4):22-23.
GAO Fuqiang, ZHANG Shaoquan. Research and popularization of wide and narrow row spacing cultivation techniques for rice [J]. China Rice, 2018,24(4):22-23. (in Chinese)

[5] 李宗泽, 张战胜, 韦峰, 等. 宁夏引黄灌区直播稻宽窄行栽培技术研究[J]. 中国稻米, 2019,25(2):81-83.
LI Zongze, ZHANG Zhansheng, WEI Feng, et al. Study on wide-narrow row planting of direct seeding rice in Ningxia Yellow River Irrigation Region[J]. China Rice, 2019,25(2):81-83. (in Chinese)

[6] WANG K, ZHOU H, WANG B, et al. Quantification of border effect on grain yield measurement of hybrid rice[J]. Field Crops Research, 2013,141(1-2):47-54.

[7] 何进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报, 2018,49(4):1-19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):1-19. (in Chinese)

[8] 王吉权, 田占伟, 王福林, 等. 水稻宽窄行插秧高留茬带状耕作农艺方法: CN109042167A[P]. 2018-12-21.

[9] TREVINI M, BENINCASA P, GUIDUCCI M. Strip tillage effect on seedbed tilth and maize production in Northern Italy as case-study for the Southern Europe environment[J]. European Journal of Agronomy, 2013,48:50-56.

[10] 张欣悦, 李连豪, 汪春, 等. 1GSZ-350 型灭茬旋耕联合整地机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009,25(5):73-77.
ZHANG Xinyue, LI Lianhao, WANG Chun, et al. Design and test of 1GSZ-350 stubble-breaking and rotary tilling combined cultivating machine[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(5):73-77. (in Chinese)

[11] 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)

[12] 赵伟, 周志立, 牛毅, 等. 深松与旋耕组合作业机具的开发[J]. 农业机械学报, 2007,38(2):79-82, 75.
ZHAO Wei, ZHOU Zhili, NIU Yi, et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(2):79-82,75. (in Chinese)

[13] 孙妮娜, 董文军, 王晓燕, 等. 东北稻区水稻收获秸秆处理方式综合效果研究[J]. 农业机械学报, 2020,51(4):69-77.
SUN Nina, DONG Wenjun, WANG Xiaoyan, et al. Comprehensive effect of rice harvesting straw treatment methods in northeast rice region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(4):69-77. (in Chinese)

[14] 王奇. 行间清秸耕整关键技术及条带耕整机研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
WANG Qi. Research on key technologies of inter-row clean-tillage and its strip-till machine[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)

[15] MORRIS N L, MILLER P C H, ORSON J H, et al. Yetter knife ideal for changing ground conditions[J]. Western Farm Press, 2010,32(27):22.

[16] 贾洪雷, 王刚, 姜铁军, 等. 1GH-3 型行间耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012,43(6):35-41, 160.
JIA Honglei, WANG Gang, JIANG Tiejun, et al. Design and experiment of 1GH-3 inter-row tillage machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):35-41, 160. (in Chinese)

[17] 李向军, 李连豪. 组合式灭茬、苗带旋耕整地机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020,41(8):13-19.
LI Xiangjun, LI Lianhao. Design and experiment of combined stubble and seedling belt rotary cultivator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(8):13-19. (in Chinese)

[18] 许春林, 孔阳阳, 闫德峰, 等. 斜置式螺旋带状整地装置研究[J]. 东北农业大学学报, 2018,49(11):74-80, 87.
XU Chunlin, KONG Yangyang, YAN Defeng, et al. Study on inclined screw integral parts [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018,49(11):74-80, 87. (in Chinese)

[19] 张欣悦, 赵大勇, 许春林, 等. 1GMMZ-280/4 型垄作组合式灭茬旋耕整地机[J]. 农机化研究, 2012,34(6):104-107.
ZHANG Xinyue, ZHAO Dayong, XU Chunlin, et al. The development of 1GMMZ-280/4 type ridge culture combined-type stubble ploughing, spin tillage soil preparation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(6):104-107. (in Chinese)

[20] 郑侃, 何进, 王庆杰, 等. 联合整地作业机具的研究现状[J]. 农机化研究, 2016,38(1):257-263.
ZHENG Kan, HE Jin, WANG Qingjie, et al. The current research status of combined tillage machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(1):257-263. (in Chinese)

[21] LEE K S, PARK S H, PARK W Y, et al. Strip tillage characteristics of rotary tiller blades for use in a dryland direct rice seeder[J]. Soil and Tillage Research, 2003,71(1):25-32.

- [22] VAN OORT P A J, GOU F, STOMPH T J, et al. Effects of strip width on yields in relay-strip intercropping: a simulation study[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020,112:125936.
- [23] 朱德泉, 储婷婷, 武立权, 等. 宽窄行配置对机插中晚稻生长特性及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018,34(18): 102–112.
ZHU Dequan, CHU Tingting, WU Liquan, et al. Effects of spacing-adjustable wide-narrow row on growth characteristics and yield of machine-transplanted mid-and late-season rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018,34(18):102–112. (in Chinese)
- [24] 王金峰, 张鑫, 唐汉, 等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021,52(11):28–39.
WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(11):28–39. (in Chinese)
- [25] 张居敏. 水田高茬秸秆旋耕埋覆机理研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014.
ZHANG Jumin. Study on mechanism of high stubble burying rotary tiller for wet land[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [26] 马成成. 水田搅浆埋茬平地机打浆刀设计与试验[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2021.
MA Chengcheng. Design and experiment of beating knife of paddy field agitating stubble burying grader[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [27] 秦宽, 周强, 曹成茂, 等. 1JM–200 灭茬旋耕一体机关键部件设计与试验[J]. *东北农业大学学报*, 2020,51(5):78–88.
QIN Kuan, ZHOU Qiang, CAO Chengmao, et al. Design and experiment of key components of 1JM–200 stubble cleaning rotary tiller integrated machine[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2020,51(5):78–88. (in Chinese)
- [28] 陈孟科, 申屠留芳, 邵鹏. 正旋耕灭茬机刀片的曲线设计[J]. *农机化研究*, 2008,30(2):107–109.
CHEN Mengke, SHEN Tuliufang, SHAO Peng. Study on curve of the blade of rotary tillage and stubble cutting machine[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008,30(2):107–109. (in Chinese)
- [29] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 犁翻旋耕复式作业耕整机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016,32(16):7–16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016,32(16):7–16. (in Chinese)
- [30] 孔德军, 高焕文, 张永康, 等. 保护性耕作条件下浅松作业的试验[J]. *农业机械学报*, 2006,37(5):48–50.
KONG Dejun, GAO Huanwen, ZHANG Yongkang, et al. Experimental study on topsoil cultivator under conservation tillage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006,37(5):48–50. (in Chinese)
- [31] 张玉, 秦华东, 黄敏, 等. 水稻根系空间分布特性的数学模拟及应用[J]. *华南农业大学学报*, 2013,34(3):304–308.
ZHANG Yu, QIN Huadong, HUANG Min, et al. Mathematical simulation of rice root spatial distribution and its application[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2013,34(3):304–308. (in Chinese)
- [32] 张作合, 张忠学, 李铁成, 等. 水炭运筹下水稻根系对氮素吸收利用的¹⁵N 示踪分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6):295–304.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, et al. ¹⁵N tracer analysis of nitrogen uptake and utilization by rice roots under water and biochar management[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021,52(6):295–304. (in Chinese)
- [33] 丁启朔, 葛双洋, 任骏, 等. 水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J]. *农业机械学报*, 2017,48(1):47–56, 63.
DING Qishuo, GE Shuangyang, REN Jun, et al. Characteristics of subsoiler traction and soil disturbance in paddy soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(1):47–56, 63. (in Chinese)
- [34] 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 Xiaofei, 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)
- [35] 王金峰, 尚文虎, 翁武雄, 等. 圆盘顶出式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021,52(6):62–72.
WANG Jinfeng, SHANG Wenhui, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of disc ejection type paddy field side deep fertilization device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(6):62–72. (in Chinese)
- [36] LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016,158:177–185.
- [37] 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)
- [38] 姚贤良, 程云生, 阎京萌, 等. 土壤物理学[M]. 北京:农业出版社, 1986.
- [39] CHEN Y, MUNKHOLM J, NYOR D. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013,126:34–41.
- [40] 吴有炜. 试验设计与数据处理[M]. 苏州:苏州大学出版社, 2002.
- [41] 毕晓伟. 影响旋耕机作业质量和功耗的主要因素[J]. *农业机械*, 2009,39(2):109–110.
BI Xiaowei. Main factors affecting working quality and power consumption of rotary cultivator[J]. *Agricultural Machinery*, 2009,39(2):109–110. (in Chinese)
- [42] 熊元芳. 水田埋草旋耕机的试验研究[J]. *农业机械学报*, 2003,34(5):177–178.
XIONG Yuanfang. Experimental study of paddy straw tiller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003,34(5):177–178. (in Chinese)