

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.004

稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验

刘晓鹏^{1,2} 张青松^{1,2} 肖文立^{1,2} 马磊^{1,2} 刘立超^{1,2} 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对长江中下游稻油轮作区油菜种植时土壤黏重板结、秸秆量大、播种作业需同步开畦沟的农艺要求, 考虑传统耕整作业耕层浅、功耗大的不足, 依据驱动圆盘犁组与传统铧式犁相比, 不易缠草堵塞、通过性好、牵引阻力小的特征, 设计了用于油菜播种的驱动圆盘犁对置组合式耕整机。提出了主动式对置犁耕与被动式开畦沟、碎土、平整相结合的联合耕整作业方案, 分析了对称布置的圆盘犁组的动力学和运动学特性, 确定了其主要结构和工作参数。根据犁体曲面成形原理, 设计了开畦沟前犁犁体曲面; 依据组合式船型开沟器与土壤挤压互作机制的分析, 确定了开畦沟区域宽度为 350 mm 时, 开畦沟系统作业后可有效保证畦沟和种床厢面质量。耕深稳定性试验表明, 整机作业实际耕深与限深深度基本一致, 耕深稳定性系数均在 90% 以上。厢面质量试验表明, 开畦沟系统在中间开畦沟区域能开出沟宽 241.6 ~ 293.5 mm, 沟深 328.6 ~ 370.8 mm 的梯形沟。经组合式船型开沟器挤压的土壤对犁沟的实际填埋率高于 87.67%, 碎土辊作业后厢面平整度为 22.45 ~ 26.70 mm, 碎土率为 60.14% ~ 68.37%。正交试验结果表明, 整机较优工作参数为: 限深深度为 180 mm, 机组前进速度为 3.5 km/h, 圆盘犁组转速为 160 r/min, 此时整机功耗为 24.37 kW, 相比传统旋耕方式的油菜播种种床整备机具的功耗降低了 37.67%, 秸秆埋覆率为 92.78%, 碎土率为 66.74%, 厢面平整度为 24.18 mm, 土壤对犁沟平均填埋率为 92.3%, 满足油菜播种的农艺要求。

关键词: 油菜; 畦沟; 圆盘犁组; 组合式; 耕整机; 试验

中图分类号: S225.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0033-09

Design and Experiment on Symmetrical Driven Disc Plows Combined Tillage Machine for Rice – Rapeseed Rotation Area

LIU Xiaopeng^{1,2} ZHANG Qingsong^{1,2} XIAO Wenli^{1,2} MA Lei^{1,2} LIU Lichao^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2}

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

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

Abstract: Considering the soil of in mid-lower Yangtze River is sticky and the amount of straw is large, the furrow should be ditched while rapeseed is planting, which leads the power consumption of traditional tillage is large. Compared with the traditional plow, driven disc plows are not easy to be blocked and traction resistance is small. The design of symmetrical type driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area was carried out. According to dynamics and kinematic analysis of driven type disc plows, its main structure and technical parameters were analyzed and determined. Based on the principle of plow forming and soil extrusion, the surface of front ditch plow was designed, and it was determined that when the width of ditching area was 350 mm, the quality of furrow and seedbed can be ensured. The tillage depth stability experiments results indicated that actual working depth of the machine was consistent with the control depth, and tillage stability coefficients were more than 90%. The seedbed quality experiments results showed that the depth and width of furrows which was ditched by ditching system were 241.6 ~ 293.5 mm and 328.6 ~ 370.8 mm, respectively. The soil squeezed by combined ship type opener can effectively filled the furrows which was formed by driven disc plows, the actual landfill rate of furrows was more than 87.67%. The seedbed roughness was 22.45 ~ 26.70 mm, soil crushing rate was 60.14% ~ 68.37%. The orthogonal test indicated that the optimum operation condition

收稿日期: 2017-08-05 修回日期: 2017-09-06

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503118-06)、农业部科研杰出人才及创新团队项目、湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)和中央高校基本科研业务费专项(2662017PY006)

作者简介: 刘晓鹏(1989—),男,博士生,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: conquermygod@163.com

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

was the tillage depth was 180 mm, the speed of machine was 3.5 km/h, and operating speed of driven disc plows was 160 r/min. Under this condition, the power consumption was 24.37 kW, straw coverage rate was 92.78%, soil crushing rate was 66.74%, seedbed roughness was 24.18 mm, and landfill rate was 92.3%. The experiment results showed that the quality of symmetrical type driven disc plows combined tillage machine satisfied the actual production requirements of rapeseed planting. The research conclusion had great theoretical value and practical significance to the design of machine which worked for planting rapeseed.

Key words: rapeseed; furrow; disc plows; combined type; tillage machine; experiment

引言

长江中下游地区是我国主要的稻油(水稻-油菜)轮作区^[1],稻油轮作可改善土壤理化性状,有利于均衡利用土壤养分^[2-4]。但该区域土壤黏重板结、秸秆量大、雨水充沛,油菜播种作业时要求种床厢面两侧开出用于排水的畦沟^[5],油菜播种种床整备作业难度大。

国外联合耕整机具以宽幅、被动式的大型联合耕整机为主^[6-9],可适用于我国北方地区的土壤耕整作业。我国南方地区的土壤耕整作业主要以犁耕和旋耕为主,传统旋耕作业碎土和耕后地表平整质量好,但功耗大、耕层较浅、秸秆埋覆能力差^[10]。传统犁耕主要采用被动式铧式犁和圆盘犁作业,对土壤和秸秆的翻垡、覆盖能力强,耕深大,耕后土壤通透性好,但在黏重板结、秸秆量大的工况下作业适应性差,碎土和平整质量不及旋耕^[11]。基于传统耕整作业存在的不足,国内外学者进行了大量的研究^[12-14],但多基于对传统旋耕的改进^[15-20],对传统犁耕作业的改进研究不多。针对长江中下游稻油轮作区土壤黏重板结、秸秆量大的工况和播种作业时同步开畦沟的农艺要求,结合传统耕整作业存在的不足,本文设计一种稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机,实现一次性完成翻耕、碎土、平整、开畦沟功能。

1 总体结构与工作原理

驱动圆盘犁对置组合式耕整机主要由主机架、中央齿轮箱、侧边齿轮箱、驱动圆盘犁组、开畦沟前犁、组合式船型开沟器、限深轮、碎土辊等组成。其中,组合式船型开沟器包括船式开沟犁和整形拖板,如图1所示。

机组作业时,对称排布的驱动圆盘犁组向机组外侧切削、翻耕土壤,中间布置的开畦沟前犁破土、翻垡形成初步畦沟沟型,组合式船型开沟器依次切削、挤压土壤,同步作业完整畦沟。后置安装的两碎土辊对驱动圆盘犁组耕后地表进行平整、碎土作业,形成适宜油菜播种的种床厢面。

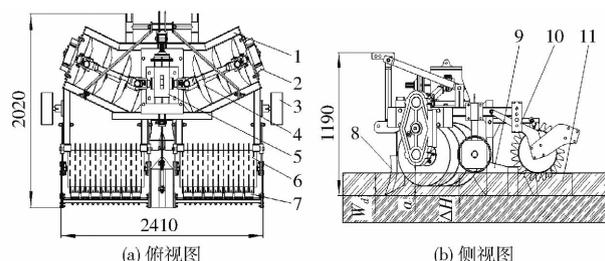


图1 驱动圆盘犁对置组合式耕整机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of symmetrical type driven disc plow combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area

1. 主机架 2. 侧边齿轮箱 3. 限深轮 4. 驱动圆盘犁组 5. 中央齿轮箱 6. 碎土辊 7. 刮土板 8. 开畦沟前犁 9. 船式开沟犁 10. 调节装置 11. 整形拖板

2 总体结构参数

两驱动圆盘犁组呈“八”字型对称排布,左右驱动圆盘犁组所受侧向力相互抵消,整机具有良好的作业稳定性。圆盘犁组的耕深过大或过小,会导致丧失切削、翻耕土壤功能。整机通过安装于主机架两侧的限深轮和后置安装的两碎土辊共同作用,实现对作业深度的限制。设计整机耕深 a 为 130 ~ 180 mm。为保证开出畦沟具有良好的排水能力,开畦沟系统拟开畦沟深度 W_d 为 250 ~ 300 mm。开畦沟前犁与组合式船型开沟器上下可调,二者与驱动圆盘犁组安装位置高度差 ΔH 保持在 70 ~ 120 mm 范围内。整机主要结构参数如表1所示。

表1 驱动圆盘犁对置组合式耕整机主要结构参数

Tab.1 Main structural parameters of symmetrical type driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area

参数	数值/类型
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 020 × 2 410 × 1 190
悬挂方式	三点悬挂
整机质量/kg	980
配套动力/kW	≥60
工作幅宽/mm	2 300
作业速度/(km·h ⁻¹)	≤6
耕作深度/mm	130 ~ 180
驱动圆盘犁工作偏角/(°)	27
驱动圆盘犁工作转速/(r·min ⁻¹)	65 ~ 188
开畦沟宽度/mm	300 ~ 400
开畦沟深度/mm	250 ~ 300

3 主要工作部件设计与分析

3.1 驱动圆盘犁组设计与分析

3.1.1 驱动圆盘犁运动学分析

以驱动圆盘犁切削刃口上一点 H 为研究对象, 从 H 点运动至刚好切削秸秆的过程中, 运动轨迹如图 2 所示, H 点沿 z 方向的位移、绝对加速度和沿 x 方向的绝对速度、绝对加速度为

$$\begin{cases} R - a = R \cos(\omega t) \\ a_z = 4\pi^2 n^2 R \cos(\omega t) \\ v_x = v - 2\pi n R \cos(\omega t) \cos\theta \\ a_x = 4\pi^2 n^2 R \sin(\omega t) \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中 R ——圆盘犁半径, mm

a ——驱动圆盘犁耕深, mm

ω ——驱动圆盘犁转动角速度, rad/s

n ——驱动圆盘犁工作转速, r/min

t ——运动时间, s

v ——机组前进速度, m/s

v_x —— H 点沿 x 方向的绝对速度, m/s

a_z —— H 点沿 z 方向的绝对加速度, m/s²

a_x —— H 点沿 x 方向的绝对加速度, m/s²

θ ——圆盘犁的工作偏角, (°)

驱动圆盘犁的作业性能与速比系数相关, 速比系数 λ 为

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{2\pi n R}{v} \quad (2)$$

当 H 点刚切削秸秆和土壤时, 为使得驱动圆盘犁能对秸秆进行有效切削, 绝对速度应满足 $v_x \geq 0$ 。由式(1)、(2)计算可得

$$\frac{1}{\cos\theta} \leq \lambda \leq \frac{R}{(R-a)\cos\theta} \quad (3)$$

根据运动分析可知, 随着驱动圆盘犁工作转速的提高, 加速度 a_x 、 a_z 加大, 增强圆盘犁的切茬能力, 使地表残茬更易于被土壤翻埋。

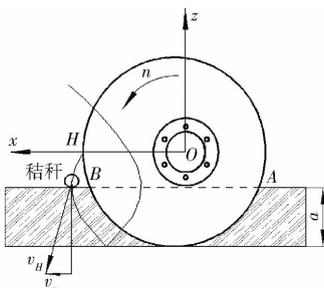


图2 驱动圆盘犁运动学分析

Fig. 2 Kinematic analysis of driven type disc plow

3.1.2 驱动圆盘犁动力学分析

驱动圆盘犁组上各圆盘犁安装倾角一致, 圆盘回转平面与机组前进方向的夹角为工作偏角, 现以

单个圆盘犁为研究对象。圆盘犁作业过程中受到土壤的挤压力 F 、轴向力 F' 和切削反力 F_t 作用。假设土壤挤压力和切削反力的作用点为 BC 弧段上一点 E , 根据理论力学平面力系简化原理^[21], 将各力作用点简化至圆盘犁回转中心 O , 驱动圆盘犁受力如图 3 所示。

$$\begin{cases} F_x = F \sin\gamma \cos\theta + F' \sin\theta - F_t \cos\gamma \cos\theta \\ F_y = F' \cos\theta + F_t \cos\gamma \sin\theta - F \sin\gamma \sin\theta \\ M_n = M_t = F_t R \\ \gamma = \frac{l_{EC}}{\pi R} \times 180 \end{cases} \quad (4)$$

式中 F_x ——土壤对圆盘犁沿 x 方向作用力, N

F_y ——土壤对圆盘犁沿 y 方向作用力, N

γ ——土壤对圆盘犁的挤压力与水平面夹角, (°)

M_n ——圆盘犁的驱动力矩, N·m

M_t ——切削反力产生的力矩, N·m

l_{EC} —— EC 弧段的长度, mm

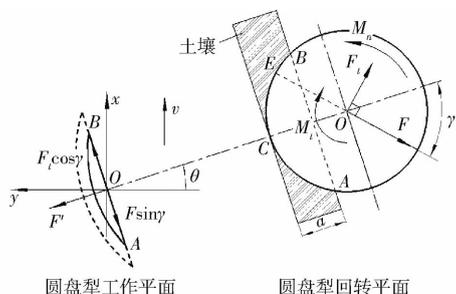


图3 土壤对驱动圆盘犁作用力分析

Fig. 3 Mechanical of driven type disc plow

根据上述受力分析, 当圆盘犁工作偏角一定时, 随着圆盘犁作业耕深增加, EC 段弧长变长, 力 F 与水平面的夹角 γ 增大, 挤压力 F 增大, 沿 x 方向作用力 F_x 增大, 增大了前进阻力。圆盘犁工作面轮廓 AB 与机组前进方向相切时的工作偏角为临界偏角, 当圆盘犁耕深一定时, 若工作偏角大于临界偏角, 随着工作偏角的减小, 圆盘犁耕幅变小, 沿 x 方向前进阻力减小。若工作偏角小于临界偏角, 圆盘犁背部受到未耕土壤刮擦和挤压作用, 随着工作偏角的减小, 反而会增大前进阻力和磨损。随着圆盘犁工作转速的增大, 圆盘犁的驱动力矩 M_n 增大, 增大了驱动功耗, 但切削反力产生的力矩 M_t 和切削反力 F_t 随之增大, 土壤对圆盘犁沿 x 方向作用力 F_x 减小, 前进阻力减小。

3.1.3 驱动圆盘犁组参数分析

根据驱动圆盘犁的动力学和运动学分析, 耕深、工作偏角和工作转速是影响其工作性能的重要因素。耕深过大或过小, 会导致丧失切削、翻耕土壤功

能。设计整机耕深为 130 ~ 180 mm, 选取驱动圆盘犁直径 D 为 550 mm^[22], 曲率半径 ρ 为 600 mm。驱动圆盘犁组上各圆盘犁安装角度一致, 故单个圆盘犁工作偏角即为驱动圆盘犁组工作偏角。根据图 3、图 4 中几何关系可知

$$\begin{cases} l_{AB} = 2\sqrt{R^2 - (R - a_{\max})^2} \\ \tan\theta_0 = \frac{l_{AB}}{2l_{OO_1}} \\ l_{OO_1} = \sqrt{l_{O_1H}^2 - l_{OH}^2} = \sqrt{\rho^2 - R^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 a_{\max} ——圆盘犁最大耕深, 取 180 mm

θ_0 ——临界工作偏角, ($^\circ$)

由式(5)可得, 临界工作偏角 θ_0 为 25.8° 。根据驱动圆盘犁的动力学分析, 选取驱动圆盘犁工作偏角 θ 为 27° , 此时单个圆盘犁的耕宽 b 为 212 ~ 235 mm。为保证整机耕幅, 同时防止出现漏耕现象, 驱动圆盘犁组上圆盘犁数量为 4, 犁体轴向间距为 240 mm, 单个驱动圆盘犁组的最大耕幅为 940 mm。由式(3)可得, 速比系数为 $1.12 \leq \lambda \leq 3.24$ 。驱动圆盘犁机组前进速度一般可达 3 ~ 6 km/h^[22], 按式(2)计算可得, 驱动圆盘犁组的工作转速 n 为 65 ~ 188 r/min。

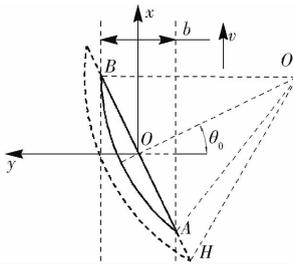


图 4 驱动圆盘犁临界工作偏角

Fig. 4 Critical working angle of driven type disc plow

3.2 开畦沟系统设计与分析

开畦沟系统由开畦沟前犁和组合式船型开沟器组成, 如图 5 所示。组合式船型开沟器具体结构及工作原理见文献[23], 其主要触土曲面为犁壁的破土曲面和整形曲面。根据拟开畦沟的要求, 设计犁体高度 H_q 为 380 mm, 最大刃口角 α 为 64.4° 。整形曲面最大元线角 Φ_{\max} 为 67° , 最小元线角 Φ_{\min} 为 65° , 犁体下底宽为 120 mm。

3.2.1 开畦沟前犁犁体曲面设计

开畦沟前犁犁体曲面采用水平直元线法形成, 导曲线位于对称中线处, 即导曲线同时也为切削刃口曲线。导曲线由始端直线 IJ 和曲线 JK 组成(图 6b), 当导曲线形状更均匀变化时, 犁体在保证开沟质量的同时具有良好的切削性能, JK 段设计为圆弧曲线。

建立如图 6 所示坐标系, 由图中几何关系可知

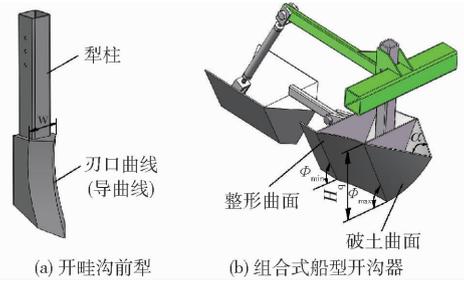


图 5 开畦沟系统工作部件

Fig. 5 Working parts of ditching system

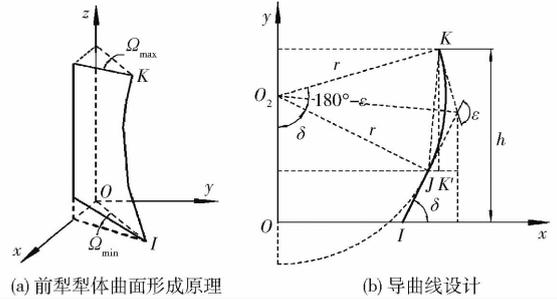


图 6 开畦沟前犁犁体曲面

Fig. 6 Surface of front ditch plow

$$\begin{cases} l_{JK'} = r\sin(\epsilon - \delta) - r\sin\delta \\ l_{JK} = \sqrt{l_{JK'}^2 + l_{KK'}^2} = 2r\cos\frac{\epsilon}{2} \\ l_{KK'} = h - l_{IJ}\sin\alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中 r ——圆弧曲线 JK 半径, mm

ϵ ——导曲线两端切线夹角, ($^\circ$)

δ ——起土角, ($^\circ$)

h ——犁体高度, mm

根据式(6)可得, 圆弧曲线 JK 的半径为

$$r = \frac{h - l_{IJ}\sin\delta}{\sqrt{4\cos^2\frac{\epsilon}{2} - [\sin(\epsilon - \delta) - \sin\delta]^2}} \quad (7)$$

开畦沟系统拟开沟深度为 250 ~ 300 mm, 故取犁体高度 h 为 350 mm。为保证犁体入土能力, 始端直线长度 l_{IJ} 为 100 mm, 起土角 δ 为 60° 。为使得导曲线平滑从而降低前进阻力, 取导曲线两端切线夹角 ϵ 为 140° 。由式(7)可得, 圆弧曲线 JK 半径 r 为 391 mm。犁体曲面元线角在始端直线 IJ 段不变, 此时为最小元线角 Ω_{\min} , 取为 40° 。元线角沿导曲线均匀增大, 曲线末端为最大元线角 Ω_{\max} , 取为 45° 。为减小犁体阻力, 同时保证翻垡功能, 设计犁体宽度 w 为 120 mm。

3.2.2 开畦沟工作区域分析

两驱动圆盘犁组均向整机外侧翻耕土壤, 作业后中间开畦沟区域形成“凸埂”(图 7a)。组合式船型开沟器将开畦沟区域的土壤切削并向两侧挤压, 填埋内侧圆盘犁耕后形成的犁沟, 从而将中间的“凸埂”形成为梯形畦沟。若开畦沟区域过宽, 则侧

向填埋的土量过多,作业后在靠近畦沟的厢面处会造成积土。若侧向挤压的土量过少,则不足以填埋圆盘犁耕后形成的沟。两种情况均会影响靠近畦沟两侧厢面的平整度及开沟质量。

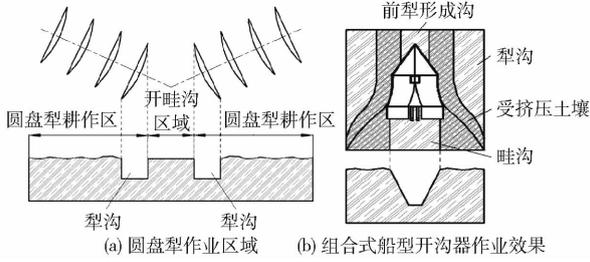


图 7 开畦沟系统工作原理图

Fig. 7 Working principle of ditching system

组合式船型开沟器对土壤两侧的挤压主要依靠犁壁的整形曲面作用,其对土壤的挤压模型如图 8 所示, $PP'Q'Q'$ 为船式开沟犁后部轮廓右半部分。作业时,开畦沟前犁先开出初步畦沟沟型,假设开沟成型过程中满足土壤体积守恒,即截面 $PQTS'$ 和截面面积 $M'N'S'S$ 相等,可得

$$\begin{cases} l_{PQ}l_{PS'} = l_{M'N'}l_{SM'} \\ l_{PS'} = a + \Delta H \end{cases} \quad (8)$$

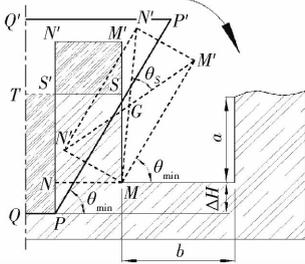


图 8 整形曲面挤压模型

Fig. 8 Extrusion model of plastic surface

土壤 $MM'N'N'$ 向侧下方挤压使其翻转,其重心点 G 落在支撑点 M 的右方时,才能使土壤稳定翻垡不产生回流,填埋圆盘犁形成的犁沟。故由图 8 可知

$$\begin{cases} \frac{\theta_s}{2} + \Phi_{\min} \leq 90^\circ \\ l_{MM'} = l_{SM'} + l_{SM} = l_{SM'} + a \\ \tan \frac{\theta_s}{2} = \frac{l_{M'N'}}{l_{MM'}} \\ L = 2l_{ST} = 2(l_{PQ} + l_{M'N'}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 θ_s ——土垡中心对角线夹角, ($^\circ$)

L ——开畦沟区域宽度, mm

由式(8)、(9)可得,开畦沟区域宽度取值范围为

$$L \leq \frac{a + \sqrt{a^2 + 4l_{PQ}(a + \Delta H) \tan \Phi_{\min}}}{\tan \Phi_{\min}} + 2l_{PQ} \quad (10)$$

挤压后的土壤对犁耕后形成的犁沟的填埋程度采用填埋率来衡量,理论填埋率为翻转土壤总截面积与犁耕形成沟的面积之比,即

$$\xi = \frac{S_{MM'N'N}}{ab} = \frac{2l_{PQ}(a + \Delta H) + a(L - 2l_{PQ})}{2ab} \times 100\% \quad (11)$$

式中 ξ ——理论土壤填埋率, %

组合式船型开沟器犁体下底宽为 120 mm, 即 $l_{PQ} = 60$ mm。开畦沟系统拟开沟深为 250 ~ 300 mm, 则

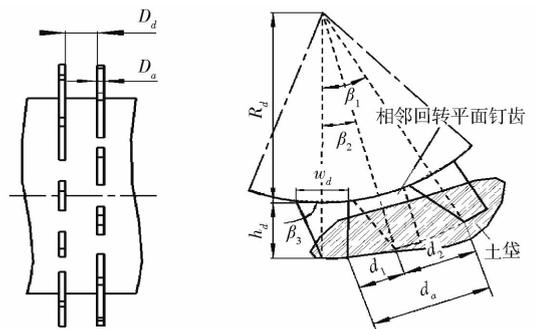
$$250 \text{ mm} \leq a + \Delta H \leq 300 \text{ mm} \quad (12)$$

由式(10)、(12)计算可得,当驱动圆盘犁组耕深为 130 ~ 180 mm 时,开畦沟区域宽度应满足 $L \leq 360$ mm。故设计开畦沟区域宽度 L 为 350 mm。按式(11)计算受挤压土壤对耕后形成的犁沟的理论填埋率为 $91.5\% \leq \xi \leq 108\%$, 填埋率大于 100% 即表示对犁沟完全填埋。此时经挤压后的土壤可将耕后形成的犁沟填埋,保证种床厢面质量。

3.3 碎土辊设计

驱动圆盘犁组作业时具备一定的碎土能力,但其主要对土壤进行翻耕,耕后地表需经碎土辊进一步碎土、平整,形成完整种床厢面。碎土辊依靠焊接于辊筒上的交错均匀排布的钉齿碾碎大块土垡。为保证碎土辊对耕后地表完全作用,设计碎土辊的辊筒横向长度与单个圆盘犁组的最大耕幅均为 940 mm。选取辊筒上相邻两回转平面上的钉齿为研究对象(图 9a),若相邻回转平面钉齿的轴向间距 D_d 过大,碎土辊作用后土垡的横向尺寸仍较大。若 D_d 过小,易使相邻钉齿间发生粘土现象,设计时选取相邻钉齿的轴向间距 D_d 为 50 mm,钉齿厚度 D_a 为 10 mm。辊筒上同一回转平面的钉齿在作业时必然存在漏切区域,当相邻两回转平面的钉齿呈偏角为 β_2 的错位排布时,两回转面的钉齿能同步交错进行碎土作业,降低漏切区域对碎土质量的影响。故设计辊筒上相邻回转平面的钉齿呈错位排布形式。

碎土辊作业时,同一回转平面内相邻钉齿间的切土节距 d_a 越小,碎土质量越好。相邻两回转平面



(a) 相邻回转平面钉齿的轴向排布 (b) 错位排布的钉齿与土垡作用
图 9 碎土辊与大块土垡的相互作用示意图

Fig. 9 Interaction diagrams of soil crushing roll with clods

的钉齿在交错对土堡作用时,交错钉齿间的切土节距 d'_a 越小,更有利于降低漏切区域对碎土质量的影响。由图 9b 可知

$$\begin{cases} d_a = \frac{\pi\beta_1(R_d + h_d)}{180} - w_d + h_d \cot\beta_3 \\ d_1 = \frac{\pi\beta_2(R_d + h_d)}{180} - w_d + h_d \cot\beta_3 \\ d_2 = \frac{\pi(\beta_1 - \beta_2)(R_d + h_d)}{180} \\ d'_a = \max(d_1, d_2) \end{cases} \quad (13)$$

式中 β_1 ——同一回转平面内相邻钉齿排布偏角, ($^\circ$)

β_3 ——钉齿刃口角, ($^\circ$)

w_d ——钉齿宽度, mm

h_d ——钉齿高度, mm

d_1 ——交错钉齿的前段切土节距, mm

d_2 ——交错钉齿的后段切土节距, mm

根据式(13)可知, 辊筒半径 R_d 越小、钉齿排布偏角 β_1 越小、高度 h_d 越小、钉齿宽度 w_d 越大、钉齿刃口角 β_3 越大, 则同一回转平面钉齿的切土节距 d_a 越小。但辊筒半径 R_d 和钉齿排布偏角 β_1 过小, 宽度 w_d 过大, 导致回转平面内钉齿排布过于紧密, 土壤易粘附于钉齿间。钉齿高度 h_d 过小, 则无法纵向切碎土堡, 丧失碎土功能。钉齿刃口角 β_3 过大, 钉齿切削刃口与土堡的接触面积小, 对土堡切削不充分。相邻回转平面钉齿的错位偏角 β_2 过大或过小均会增大交错钉齿间的切土节距 d'_a 。根据上述分析, 设计辊筒直径为 380 mm, 钉齿高度 h_d 为 70 mm。钉齿宽度 w_d 为 65 mm, 钉齿刃口角 β_3 为 70° , 同一回转平面内相邻钉齿排布偏角 β_1 为 30° , 相邻回转平面钉齿的错位偏角 β_2 为 15° 。碎土辊钉齿排列图如图 10 所示。

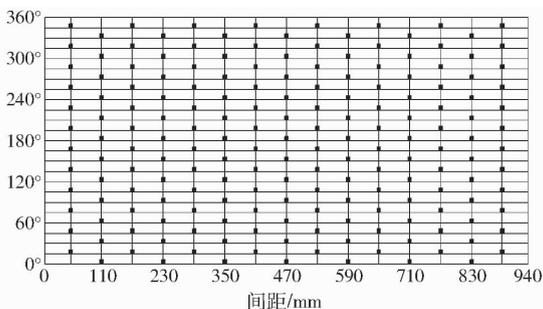


图 10 碎土辊钉齿排列示意图

Fig. 10 Arrangement of nail teeth of soil crushing roll

4 试验

4.1 试验设备与条件

试验在华中农业大学现代农业科技试验基地进行, 试验田块常年稻油轮作, 土壤类型为黄棕壤, 平均土壤坚实度为 848.44 kPa, 土壤干基含水率平均

值为 24.67%, 土壤容重为 1.28 g/cm^3 , 地表平均秸秆覆盖量为 1.06 kg/m^2 , 平均留茬高度为 14.7 cm。试验配套动力为东方红 LX804 型拖拉机。试验器材: 直尺(500 mm)、卷尺(5 m)、磁性水平尺(三箭工具有限公司, 精度 0.0029°)、土壤坚实度仪(浙江托普仪器有限公司, TJSD-750 II 型, $\pm 0.5\%$ FS)、土壤水分测试仪(浙江托普仪器有限公司, TZS-2X 型, $\pm 0.01\%$)、CKY-810 型扭矩传感器(北京中航科仪测控技术有限公司, 转速测量范围 $0 \sim 4000 \text{ r/min}$, 精度 $\pm 1\%$, 扭矩测量范围 $0 \sim 1000 \text{ N}\cdot\text{m}$, $\pm 1\%$)、BK-5 型拉压力传感器(北京中航科仪测控技术有限公司, 测量范围 $0 \sim 30 \text{ kN}$, $\pm 1\%$)、动态数据采集器、PC 主机。功耗测试系统如图 11 所示。



图 11 功耗测试系统

Fig. 11 Power consumption test system

1. 动态数据采集器
2. BK-5 型上拉杆拉压力传感器
3. CKY-810 型扭矩传感器
4. BK-5 型下拉杆拉压力传感器

4.2 试验方法

4.2.1 耕深稳定性及厢面质量试验设计

整机通过同时调节限深轮、碎土辊与圆盘犁组的相对高度进行限深, 二者与驱动圆盘犁组的安装高度差 Δh 即为限深深度。开畦沟系统和碎土辊对犁耕后地表进行开沟、碎土、平整作业, 形成适宜播种的种床厢面。为探究整机耕深稳定性及开畦沟系统、碎土辊作业后形成厢面的质量, 试验选取限深深度 Δh 为试验因素, 因素水平为 130、180 mm。整机实际耕深、耕深稳定性系数为耕深稳定性的评价指标, 畦沟沟型参数、土壤对犁沟填埋率、碎土率、厢面平整度为厢面质量的评价指标。试验前调节限深轮与碎土辊高度一致, 通过试验确定限深装置恰好与地面接触时拖拉机液压手柄的位置, 通过调节拖拉机挡位和手油门保证机组前进速度为 4.3 km/h , 圆盘犁转速为 130 r/min , 试验机组沿直线方向作业距离为 40 m, 取中间行程 30 m 为测量区域, 每组试验重复 3 次。在测量区域等距取 10 个测量点, 测绘每个测量点处的厢面断面形状, 并测量该处的耕深、耕宽、碎土率、平整度。相关参数的测量方法参照文献[14, 24], 根据测绘所得厢面断面形状, 计算土壤对耕后形成犁沟的实际填埋率为

$$\xi_a = \frac{S_T}{S_L} \times 100\% \quad (14)$$

式中 ξ_a ——实际填埋率, %

S_T ——犁沟区域处的厢面断面面积, mm^2

S_L ——犁沟区域面积, mm^2

4.2.2 正交试验设计

为获得整机较优的工作参数, 开展机组前进速度、圆盘犁组工作转速、限深深度对整机作业功耗和埋茬质量影响的试验。采用拟水平法进行试验设计, 试验前已测得拖拉机挡位、手油门与机组前进速度、后输出轴转速的对应关系, 试验因素水平见表 2。试验指标为整机功耗、秸秆埋覆率, 相应的测量方法参照文献[14-15]。

表 2 试验因素水平

Tab.2 Test factors and levels

水平	限深深度	机组前进速度	圆盘犁组工作转速
	$\Delta h/\text{mm}$	$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1	130	3.5	90
2	180	4.3	130
3		5.2	160

4.3 试验结果与分析

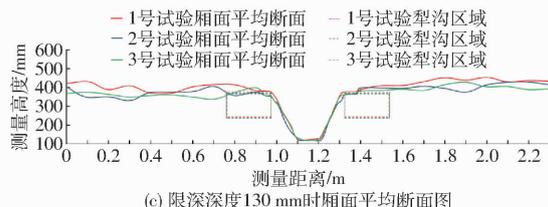
4.3.1 耕深稳定性和厢面质量

整机在不同限深深度时的作业效果如图 12 所示, 试验结果见表 3。由试验结果可知, 通过限深轮和碎土辊共同作用可较好地达到控制整机耕深的效果, 整机实际耕深与限深深度基本一致, 且耕深稳定

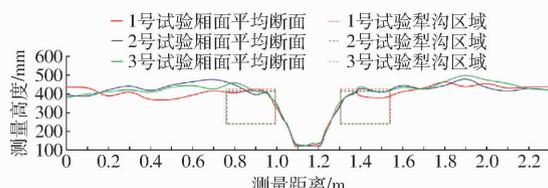
性均在 90% 以上。在耕深为 130、180 mm 时, 开畦沟系统在中间开畦沟区域能开出明显的梯形沟, 沟宽为 328.6 ~ 374.8 mm, 沟深为 241.6 ~ 293.5 mm。中间开畦沟区域土壤经组合式船型开沟器挤压后, 能有效埋埋耕后形成的犁沟, 实际填埋率高于 87.67%。碎土辊作业后厢面平整度为 22.45 ~ 26.70 mm, 碎土率为 60.14% ~ 68.37%, 厢面质量达到油菜播种要求^[25]。



(a) 限深深度 130 mm 时作业效果 (b) 限深深度 180 mm 时作业效果



(c) 限深深度 130 mm 时厢面平均断面图



(d) 限深深度 180 mm 时厢面平均断面图

图 12 田间试验效果与断面分析

Fig. 12 Effects and section analysis of field experiment

表 3 耕深稳定性与开沟质量试验结果

Tab.3 Experiment results of tillage stability and ditching quality

限深深度/ mm	试验号	实际平均耕深/ mm	耕深稳定 系数/%	平均沟宽/ mm	平均沟深/ mm	实际平均土壤 填埋率/%	碎土率/ %	厢面平整度/ mm
130	1	134.1	93.92	343.10	257.30	100	66.64	25.22
	2	132.1	92.01	328.60	241.60	96.73	67.61	26.09
	3	127.0	91.86	335.20	243.80	100	68.37	22.45
180	1	184.0	93.97	370.80	293.50	87.67	60.14	25.28
	2	174.5	92.74	350.30	278.40	90.45	63.17	24.67
	3	177.0	94.21	374.80	285.20	90.09	60.86	26.70

4.3.2 正交试验结果分析

正交试验结果如表 4 所示, A、B、C 为因素水平值。由耕深稳定性试验结果可知, 整机限深深度与耕深基本一致, 即限深深度可视为耕深。方差分析表明, 耕深对整机功耗和秸秆埋覆率均有极显著影响; 机组前进速度对整机功耗影响显著; 驱动圆盘犁组工作转速对秸秆埋覆率影响显著。正交试验结果表明, 整机功耗随着耕深的减小而降低, 秸秆埋覆率显著降低。圆盘犁组耕深越大, 与土壤接触更充分, 对秸秆翻埋效果更好, 但会增大前进阻力, 增加整机

驱动功耗和牵引功耗。为增加耕层深度, 提高对秸秆埋覆能力, 选择耕深较大的 180 mm 为最优水平; 机组前进速度增大使整机功耗显著上升, 且对秸秆埋覆率无显著影响, 选择 3.5 km/h 为较优水平; 整机的驱动功耗随着驱动圆盘犁组工作转速的增大而增大, 但驱动圆盘犁组切削反力增大, 降低了机组的前进阻力, 整机牵引功耗减小, 故工作转速的增大没有显著提高整机功耗。且工作转速的增大, 提高了秸秆埋覆率, 故选择 160 r/min 为最优水平。综上分析, 整机较优工作方案: 限深深度 180 mm, 机组前进

表4 试验设计与结果

Tab.4 Experimental design and results

试验号	试验因素			试验指标	
	A	B	C	整机功耗/kW	秸秆埋覆率/%
1	1	1	1	18.55	80.32
2	1	2	2	20.33	82.67
3	1	3	3	21.93	84.47
4	2	1	2	23.96	88.36
5	2	2	3	27.49	90.73
6	2	3	1	29.13	85.36
7	2	1	3	24.37	92.78
8	2	2	1	25.36	86.42
9	2	3	2	30.57	87.07
	<i>F</i>	80.81**	17.23*	0.26	
整机功耗	<i>k</i> ₁	20.27	22.29	24.35	
	<i>k</i> ₂	26.81	24.39	24.95	
	<i>k</i> ₃		27.21	24.60	
	<i>R</i>	6.54	4.92	0.61	
	<i>F</i>	117.08**	2.92	35.24*	
秸秆埋覆率	<i>k</i> ₁	82.49	87.15	84.03	
	<i>k</i> ₂	85.45	86.61	86.03	
	<i>k</i> ₃		85.63	89.33	
	<i>R</i>	5.97	1.52	5.29	

注: **和*分别表示方差分析在0.01和0.05水平上显著。

速度3.5 km/h,圆盘犁组工作转速160 r/min。此时整机功耗为24.37 kW,秸秆埋覆率为92.78%,碎土率为66.74%,厢面平整度为24.18 mm,土壤对犁沟平均埋率为92.3%。相比传统旋耕方式的油菜种床整备机具^[15],整机作业耕深更大,功耗降低了37.67%,作业质量达到油菜播种要求。

5 结论

(1)设计了适应于稻油轮作区油菜种植的驱动圆盘犁对置组合式耕整机,主要包括呈八字型对称布置的驱动圆盘犁组、被动式的开畦沟系统和碎土辊,能一次完成翻耕、开沟、平整、碎土作业。

(2)开展了对称布置的圆盘犁组的动力学和运动学特性分析,确定了圆盘犁组工作偏角为27°,工作转速为65~188 r/min。分析组合式船型开沟器与土壤挤压作用的互作机制,确定了中间开畦沟区域宽度为350 mm。

(3)耕深稳定性试验表明,整机实际耕深与限深深度基本一致,且耕深稳定性均在90%以上。厢面质量试验表明,开畦沟系统在中间开畦沟区域能开出沟深241.6~293.5 mm,沟宽328.6~374.8 mm的梯形沟。经组合式船型开沟器挤压后的土壤能有效填埋犁沟。碎土辊作业后厢面平整度为22.45~26.70 mm,碎土率为60.14%~68.37%,厢面质量达到油菜播种要求。

(4)正交试验表明:耕深对整机功耗和秸秆埋覆率均有极显著影响;机组前进速度对整机功耗影响显著;驱动圆盘犁组工作转速对秸秆埋覆率影响显著。整机较优工作参数为:限深深度为180 mm,机组前进速度为3.5 km/h,驱动圆盘犁工作转速为160 r/min时,整机功耗为24.37 kW,秸秆埋覆率为92.78%,碎土率为66.74%,厢面平整度为24.18 mm,土壤对犁沟平均埋率为92.3%。

参 考 文 献

- 1 吴崇友. 稻油(麦)轮作机械化技术[M]. 北京:中国农业出版社,2013.
- 2 曹继华,刘樱,赵小蓉,等. 不同秸秆覆盖方式对稻-油轮作土壤理化性状影响[J]. 西南农业学报,2011,24(6):2101-2105. CAO Jihua, LIU Ying, ZHAO Xiaorong, et al. Effects of different straw covering farming patterns on soil physicochemical properties under rice-oilseed rape cropping system[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(6):2101-2105. (in Chinese)
- 3 黄华磊,石有明,谷明禹,等. 稻油轮作制中栽培方式对油菜产量和经济效益的影响[J]. 中国农学通报,2014,30(12):229-233. HUANG Hualei, SHI Youming, GU Mingyu, et al. Effect of planting patterns on rapeseed yields and economic benefits in rice-rapeseed rotation system[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(12):229-233. (in Chinese)
- 4 张丹,付斌,胡万里,等. 秸秆还田提高水稻-油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J]. 农业工程学报,2017,33(9):133-140. ZHANG Dan, FU Bin, HU Wanli, et al. Increasing soil nitrogen fixation capacity and crop yield of rice-rape rotation by straw returning[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9):133-140. (in Chinese)
- 5 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]. 中国油料作物学报,2010,36(1):170-176. SONG Fengping, HU Liyong, ZHOU Guangsheng, et al. Effects of waterlogging time on rapeseed (*Brassica napus* L.) growth and yield[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 36(1):170-176. (in Chinese)
- 6 贾洪雷,陈忠亮,刘昭辰,等. 耕整联合作业工艺及配套机具的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(5):40-43. JIA Honglei, CHEN Zhongliang, LIU Zhaochen, et al. Study on technology and maching machine for rototilling-tillage combined operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5):40-43. (in Chinese)
- 7 贾洪雷,马成林,刘枫,等. 秸秆与根茬粉碎还田联合作业工艺及配套机具[J]. 农业机械学报,2005,36(11):46-49. JIA Honglei, MA Chenglin, LIU Feng, et al. Study on technology and matching for stalk/stubble breaking and mulching combined operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11):46-49. (in Chinese)
- 8 TAO Zhiqiang, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al. Subsoiling and ridge tillage alleviate the high temperature stress in spring maize

- in the North China plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2013,12(12):2179-2188.
- 9 RAPER R L, REEVES D W, SHAW J N, et al. Benefits site specific subsoiling for cotton production in coastal plain soils[J]. *Soil and Tillage Research*,2007,96(1):174-181.
- 10 夏俊芳,许绮川,周勇. 旋耕技术的研究现状和发展趋势[J]. *华中农业大学学报*,2005,24(增刊1):83-85.
XIA Junfang, XU Qichuan, ZHOU Yong. Status and research prospects for the technology of rotary tillage[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2005,24(Supp.1):83-85. (in Chinese)
- 11 洪筠,崔占荣,任露泉. 仿生犁与普通犁作业综合经济效益的对比分析[J]. *农业机械学报*,2006,37(10):93-96.
HONG Yun, CUI Zhanrong, REN Luquan. Analysis on whole economic benefits of bionic plow and common plows plowing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2006,37(10):93-96. (in Chinese)
- 12 周勇,余水生,夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*,2012,43(8):46-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120809&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.009.
ZHOU Yong, YU Shuisheng, XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2012,43(8):46-49. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 张青松,肖文立,廖庆喜,等. 油菜直播机深浅旋耕组合式种床整备装置的设计与试验[J]. *华中农业大学学报*,2016,35(4):121-128.
ZHANG Qingsong, XIAO Wenli, LIAO Qingxi, et al. Designing a deep-shallow rotary tillage device of direct rapeseed seeder[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*,2016,35(4):121-128. (in Chinese)
- 15 张居敏,贺小伟,夏俊芳,等. 高茬秸秆还田耕整机功耗检测系统设计与试验[J]. *农业工程学报*,2014,30(18):38-46.
ZHANG Jumin, HE XiaoWei, XIA Junfang, et al. Design and field experiment of power consumption measurement system for high stubble returning and tillage machine[J]. *Transactions of the CSAE*,2014,30(18):38-46. (in Chinese)
- 16 丁为民,王耀华,彭嵩植. 正、反旋耕不同耕作性能的比较[J]. *南京农业大学学报*,2003,26(3):106-109.
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Comparison on performance of up cut and down cut rotary tillage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*,2003,26(3):106-109. (in Chinese)
- 17 方会敏,姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(1):60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160109&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw soil rotary blade system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(1):60-67. (in Chinese)
- 18 方会敏,姬长英, FARMAN Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(3):22-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(3):22-28. (in Chinese)
- 19 郭俊,姬长英, CHAUDHRY Arslan, 等. 稻麦秸秆旋耕作业中受力与位移分析[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(10):11-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.002.
GUO Jun, JI Changying, CHAUDHRY Arslan, et al. Stress and displacement analyses of rice and wheat straws in rotary tillage process[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(10):11-18. (in Chinese)
- 20 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*,2015,46(9):112-117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150916&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016.
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(9):112-117. (in Chinese)
- 21 西涅科夫 Г H,潘诺夫 N M. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- 22 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:中国农业机械出版社,2007.
- 23 刘晓鹏,肖文立,马磊,等. 油菜联合直播机组式船型开沟器设计与开沟质量试验[J/OL]. *农业机械学报*,2017,48(11):79-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.010.
LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2017,48(11):79-87. (in Chinese)
- 24 秦宽,丁为民,方志超,等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. *农业工程学报*,2016,32(9):1-8.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. *Transactions of the CSAE*,2016,32(9):1-8. (in Chinese)
- 25 NT/Y 2709—2015 油菜播种机作业质量[S]. 2015.