

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.14.013

稻茬地油菜微垄联合直播机制垄装置设计与试验

李 林¹ 廖庆喜^{1,2} 王旭峰³ 杜文斌¹ 袁 华¹ 林建新¹ 肖文立^{1,2}

(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;
3. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 针对长江中下游地区降雨时空分布不均常引发油菜旱涝胁迫风险以及稻油轮作体系下油菜直播面临秸秆量大和土壤黏重板结等问题, 本文提出一种犁翻埋茬、旋耕抛土制垄、主动滚压整形、微垄表面播种的油菜微垄直播工艺, 设计了一种稻茬地油菜微垄精量联合直播机埋茬制垄装置。基于直纹面法设计了翻垡类铧犁体曲面, 分析了土垡沿犁面运动过程, 建立了土垡运动学模型, 并得出土垡在三轴方向最大位移为 $l_x = 0.213\text{ m}$ 、 $l_y = 0.479\text{ m}$ 以及 $l_z = 0.197\text{ m}$ 。为实现均匀分垡后制垄, 确定了旋耕刀排布方式, 并配合分垡制垄装置实现犁翻后均匀制垄。为提高垄形一致性, 基于微垄农艺要求, 设计了微垄整形牙辊结构参数, 分析并确定了旋耕刀轴与整形牙辊较优转速比为 0.39。翻垡类铧犁组和整机作业性能田间试验结果表明: 翻垡犁组平均耕深为 188 ~ 195 mm、耕深稳定性系数不小于 85.29%、翻垡率不小于 80.19%; 整机埋茬率不小于 80.32%、碎土率不小于 81.69%、微垄高度为 146 ~ 149 mm、微垄底宽为 348 ~ 352 mm、微垄顶宽为 121 ~ 128 mm、垡体稳定性系数不小于 80.33%, 作业质量满足稻茬地油菜微垄直播要求。研究结果为犁翻埋茬和稻茬地油菜机械直播微垄种床制备提供了参考。

关键词: 油菜播种机; 微垄制备; 稻茬地; 微垄

中图分类号: S225.92 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0138-13 OSID: 

Design and Experiment of Ridge-forming Device for Micro-ridge Combined Direct Seeder of Rapeseed in Rice Stubble Fields

Li Lin¹ Liao Qingxi^{1,2} Wang Xufeng³ Du Wenbin¹ Yuan Hua¹ Lin Jianxin¹ Xiao Wenli^{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 and Rural Affairs, Wuhan 430070, China
3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: Aiming to address the risks of drought and waterlogging stress in rapeseed caused by uneven spatiotemporal rainfall distribution in the middle and lower Yangtze River region, as well as challenges in direct seeding under rice-rapeseed rotation due to high straw volume and soil compaction, a micro-ridge direct seeding technology was proposed. This technology integrated stubble plowing, rotary tillage, ridge forming, active rolling, and surface seeding. A precision combined seeder with a stubble-burying and ridge-forming device was developed. Using the ruled surface method, the plow surface was designed, and soil clod kinematics were analyzed to establish a model and determine maximum displacements in three axes. Rotary blade arrangement was optimized for uniform ridge formation, complemented by a soil-separating and ridge-forming device. Structural parameters of the micro-ridge shaping roller were designed based on agronomic requirements, and an optimal speed ratio between the rotary blade shaft and shaping roller was determined. Field tests demonstrated the plow group's average tillage depth of 188 ~ 195 mm, depth stability coefficient not less than 85.29%, and stubble turnover rate not less than 80.19%. The seeder achieved a stubble burial rate not less than 80.32%, soil breaking rate not less than 81.69%, micro-ridge height of 146 ~ 149 mm, bottom and top widths of 348 ~ 352 mm, and ridge stability coefficient not less than 80.33%, meeting micro-ridge seeding requirements. The research result can provide a reference for stubble plowing and micro-ridge seedbed preparation in mechanical rapeseed direct seeding.

Key words: rapeseed sowing machine; micro-ridge preparation; rice stubble fields; micro-ridge

0 引言

微垄种植可有效应对长江中下游因降雨时空分布不均匀导致油菜出苗成苗差的问题^[1],李蒙良等^[2-3]提出了油菜微垄种植工艺,并设计了油菜微垄播种机;降雨量大时通过垄沟排水,避免垄顶幼苗受渍害;降雨量少时,垄沟蓄水保墒,提高垄沟成苗率,采用微垄种植模式实现旱涝保收,保证油菜产量。现有油菜微垄播种机作业工况为犁翻埋茬、旋耕碎土后的已耕地,尚缺乏对水稻收获后留茬黏重地表适应性研究。

国外多为旱地种植,因此大多采用免耕、宽幅、被动式联合耕整地装备^[4-6]。长江中下游地区多为水旱轮作模式,稻茬地制备微垄面临秸秆量大、土壤黏重板结、犁底层较厚等问题^[7-9]。目前实际生产中大多采用先斜置多铧犁深翻埋茬再旋耕碎土,完成埋茬和碎土的同时,增加了耕作层厚度,但需机组多次下地,对土壤多次碾压的同时增加了成本^[10]。为减少机具进地次数和降低成本,研究人员对集埋茬和碎土功能于一体的耕整地装备展开了研究。张银平等^[11]针对稻麦轮作区水稻直播种床质量要求高的需求,设计了一种集反旋灭茬和正旋碎土技术于一体的灭茬播种机;杜文斌等^[12]设计了一种适用于高茬黏重工况下反旋埋茬碎土装置,配置埋茬弯刀和双刃旋耕刀,碎土率较高;但反旋存在易壅堵和耕层较浅等问题,旋耕深度通常在 15 cm 左右^[11-13]。针对上述问题,部分学者借鉴先犁翻埋茬后旋耕碎土的作业思路,结合减少拖拉机下地次数的要求,对犁旋一体装备进行了大量研究。廖庆喜等^[14]针对秸秆量大和耕层浅等问题,设计了一种对置式主动圆盘犁翻垡和旋耕碎土的耕整地装备,构建了“上松下紧”的合理种床结构,在此基础上,配置了双刃旋耕刀,进一步提高了埋茬率^[15];孙文成等^[7]研制了一种斜置圆盘犁左翻埋茬和反旋碎土的油菜种床耕整装备,埋茬和防壅土性能较好;圆盘犁耕作深度通常为 15~18 cm,较旋耕有更厚的耕作层^[7,13-14]。研究人员^[16-17]设计了对置翻垡犁组与旋耕装置一体的犁旋耕整地装备,耕作层较深(>18 cm)且埋茬效果较好。反旋和犁旋一体耕整地装备均能实现埋茬和碎土,且犁旋耕作层更深,能为油菜扎根提供更合理的种床。

针对长江中下游稻油轮作区冬油菜种植时面临茬口问题突出、耕层较浅、降雨时空分布不均等实际情况,在采用油菜微垄种植模式提高油菜抗逆性的基础上,本文以埋茬率高、耕作层较深、碎土率高、垄体稳定性强为设计目标,提出“犁翻埋茬+旋耕抛

土分垡制垄+主动滚压修饰垄型”的微垄种床制备工艺,设计一种稻茬地油菜微垄联合播种机埋茬制垄装置。

1 整机结构与工作过程

1.1 油菜微垄种植农艺要求与机具设计目标

稻茬地油菜微垄种植以机械化直播种植模式为主,种植农艺要求如图 1 所示。垄顶和垄沟均种植,垄宽 300~350 mm;垄高 75~150 mm;两侧畦沟宽度 200~300 mm;畦沟深度 150~250 mm。

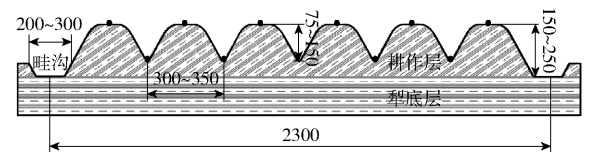


图 1 油菜微垄种植农艺要求示意图
Fig. 1 Schematic of agronomic requirements for micro-ridge planting of rapeseed

针对油菜在稻茬地机械化微垄种植作业工况,以及油菜在长江中下游地区种植范围较广的情况,机具设计目标为:①耕作层深:采用平行排布翻垡类铧犁组,完成翻垡埋茬、提高土壤通气性、增加耕作深度,为油菜扎根提供有利条件。②埋茬率高:埋茬率是评价油菜种床质量的重要指标,并且秸秆还田有利于促进直播油菜生长发育和提高产量。③通过性好:翻垡过程土垡运移不壅堵,以承接埋茬后的碎土工序。④碎土率高:采用犁旋组合式耕地方案,为油菜微垄种植提供碎土率较高的种床整备条件。⑤垄体稳定性强:垄腰紧实,防止垄体坍塌导致土壤回填垄沟,采用“被动分垡初步制垄+主动滚压修饰垄型”的作业方式,提高垄体稳定性和一致性。

1.2 整机结构与参数

如图 2 所示,稻茬地油菜微垄精量联合直播机由翻垡类铧犁组、开畦沟犁、施肥装置、旋耕装置、分垡制垄装置、微垄整形牙辊、传动装置及气送式排种器等核心组件构成。

翻垡类铧犁组采用双排反向排列结构,配置 6 组可调式翻垡类铧犁单元,通过横向相邻犁体反向配置实现双向翻垡作业。相对于机具前进方向,后排翻垡类铧犁固定于旋耕装置前梁处,各犁体配备独立深度调节机构以满足差异化耕作需求。施肥系统采用同步施播方式,排肥管末端经优化设计固定于旋耕装置前梁上方,在犁组实施翻耕作业过程实现肥料与土壤的即时混合。开畦沟犁采用双侧布置方案,与旋耕装置形成联动工作机制,确保畦沟成形与碎土的作业协同性。分垡制垄装置基于传统旋耕机平土拖板结构改进设计,将原有平整功能转换为

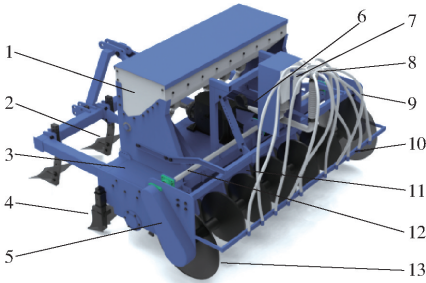


图2 稻茬地油菜微垄精量联合直播机结构示意图

Fig. 2 Diagram of structure of precision combined seeder for rapeseed in rice stubble fields

1. 肥箱 2. 翻垅类铧犁 3. 旋耕装置 4. 开畦沟犁 5. 二级链条传动单元 6. 一级链条传动单元 7. 种箱 8. 分配头 9. 导种管 10. 导种管固定架 11. 分垅制垅装置 12. 动力传动轴 13. 微垄整形牙辊

分垅制垅功能。该装置利用旋耕刀轴旋转产生的后向抛土效应,实现土壤被动分导与垅形初步构建。配置的微垄整形牙辊采用主动滚压方式,通过表面牙纹结构对初始垅体实施二次整形,提升垅体结构稳定性与垅形几何一致性。播种采用气送式集排器,该装置架设于微垄整形牙辊上方。整机关键性能参数如表1所示。

表1 主要技术参数	
Tab.1 Main technical parameters	
参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 050×2 300×1 500
工作幅宽/mm	2 300
配套功率/kW	70~90
作业速度/(km·h ⁻¹)	5~6
翻垅类铧犁/套	6
犁耕深度/mm	180~200
旋耕深度/mm	100~120
畦沟宽度/mm	200~300
畦沟深度/mm	≥150
微垄行数/行	6
微垄间距/mm	350
微垄高度/mm	120~150
播种行数/行	10
播种行距/mm	160~175

1.3 工作过程

稻茬地油菜微垄精量联合直播机工作流程如图3所示,包括:①犁翻与施肥:翻垅类铧犁对稻茬地表进行翻垅以实现埋茬,同时向犁翻过程中的土壤施肥。②碎土同步开畦沟:旋耕装置将犁翻后地表旋耕碎土,装置两侧畦沟犁同步开出畦沟。③分垅初步制垅:旋耕刀将土壤切碎并往后抛送,分垅制垅装置将土壤往两侧分开,出现明显垅沟,实现初步制垅。④滚压垅体整形:垅体整形牙辊通过传动装置由中央变速箱分配动力,对初步制得的微垄进行主

动滚压,达到增加垅体紧实度和提高垅形一致性的目的。⑤播种:对垅顶和垅沟进行播种(播种于种床表面),由于油菜播种采用双行播种,因此不对中间垅沟进行播种作业,播种行数为10。

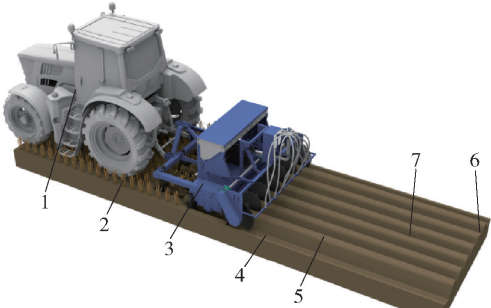


图3 稻茬地油菜微垄精量联合直播机作业示意图

Fig. 3 Schematic of operation of rape micro-ridge precision combined direct seeding machine in rice stubble field

1. 拖拉机 2. 水稻秸秆 3. 稻茬地油菜微垄精量联合直播机 4. 畦沟 5. 微垄顶 6. 微垄沟 7. 非播种行

2 关键部件设计

2.1 翻垅类铧犁排布与参数设计

2.1.1 翻垅类铧犁排布

传统多铧犁采用斜置排布方式,纵向尺寸过长,导致机组转弯半径较大。如图4所示,设计了一种由6套类铧犁组成的双排反向翻垅平行犁组,在缩减犁组纵向尺寸基础上,保证了犁组作业满足埋茬要求。

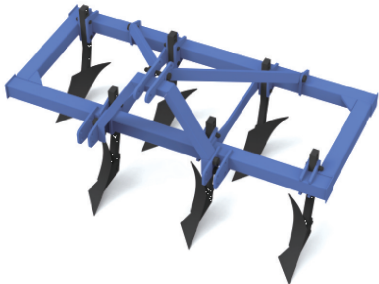


图4 双排反向平行犁组

Fig. 4 Double-row reverse parallel plow set

2.1.2 犁体曲面形成原理

土垅在犁体曲面上运动过程包括切土、抬垅和翻垅3个阶段,以完成对地表稻茬的有序翻埋^[18]。基于翻垅犁有序翻埋的特点,结合犁组排布方式,设计一种有序翻埋且土垅侧向位移较小的类铧犁,以实现稻茬地工况下埋茬和防堵。

根据直纹面形成原理,构建犁体曲面如图5所示。其中 θ_0 为元线角,AH沿导曲线ABCD自下而上平移并使元线角按一定规律逐次增加以构成犁体曲面。犁体曲面包括犁铧、犁胸和犁翼:犁铧完成切土和抬垅;犁胸使土垅上升并为其创造翻转的纵向空

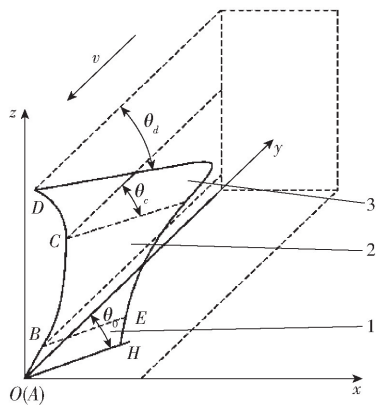


图 5 犁体曲面形成原理图

Fig. 5 Knife cutting pattern and area

1. 犁铧 2. 犁胸 3. 犁翼

间,且实现土堡初步翻转;犁翼完成土堡进一步翻转并使之稳定,至此完成埋茬作业。

2.1.3 犁体曲面参数设计

在作业过程犁组需满足不壅土并实现高效埋茬的功能要求。与传统铧式犁不同,传统铧式犁强调沟底与沟壁完整性以及堡条均匀一致性,而翻堡类铧犁在满足油菜合理种床耕深要求^[13]的基础上,还需确保土堡侧向位移较小且翻堡性能强。因此,犁体曲面的三轴尺寸设计相对较小,同时土堡在犁体曲面上翻转速度较快,以实现高效的埋茬效果,同时相邻且相向翻转的 2 个土堡之间形成稳定的结构,从而为分堡制微垄工序提供良好的种床条件。

在犁体曲面上土堡翻转速度和侧向位移是由基于导曲线的元线角变化规律决定的。建立导曲线数学模型如图 6 所示。导曲线由线段 AB、抛物线段 BC 和圆弧 CD 构成;其中 AB 匹配犁铧部分,因其功能为切土和抬堡,因此选用直线段;BC 匹配犁胸部分,因其主要功能为土堡初步翻转,因此选用抛物线段,斜率逐步增加结合元线角增加利于土堡翻转;CD 匹配犁翼部分,因其功能为进一步翻转土堡,因

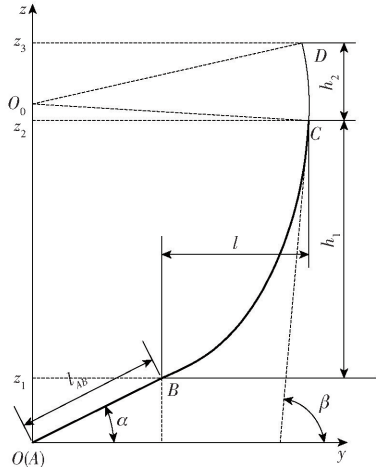


图 6 导曲线示意图

Fig. 6 Curve diagram

此选用圆弧。导曲线处处连续可导,其中点 B 坐标为 (y_1, z_1) ,斜率为 $\tan\alpha$;点 C 坐标为 (y_2, z_2) ,斜率为 $\tan\beta$;点 D 坐标为 (y_3, z_3) 。

导曲线参数方程为

$$z = \begin{cases} ky & (AB \text{ 段}) \\ ay^2 + by + c & (BC \text{ 段}) \\ \sqrt{r^2 - y^2} + h & (CD \text{ 段}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 k, a, b, c, h ——常数

r ——CD 段圆弧半径,cm

由图 6 可得

$$\begin{cases} \tan\alpha = k = 2ay_1 + b \\ \tan\beta = 2ay_2 + b = \frac{-y_2}{\sqrt{r^2 - y_2^2}} \\ l_{AB} = \frac{z_1}{\sin\alpha} \\ l = y_2 - y_1 \\ h_1 = z_2 - z_1 \\ h_2 = z_3 - z_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 l_{AB} ——直线段 AB 长度,cm

l ——抛物线 BC 开度,cm

h_1 ——抛物线 BC 高度,cm

h_2 ——圆弧 CD 高度,cm

联立参数方程(1)、(2)可得

$$\begin{cases} k = \tan\alpha \\ a = \frac{h_1 - l\tan\alpha}{(y_2 + y_1 - 2)l} \\ b = \tan\alpha - \frac{2(h_1 - l\tan\alpha)}{(y_2 + y_1 - 2)l} \\ c = h_1 + l_{AB}\sin\alpha - (ay_2^2 + by_2) \\ h = h_1 + l_{AB}\sin\alpha - \frac{y_2}{2by_2 + c} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,导曲线方程由犁铧安装角 α 、始端直线长度 l_{AB} 、抛物线开度 l 、抛物线高度 h_1 、圆弧线高度 h_2 决定。参照文献[19]犁体设计方法中导曲线各参数取值范围,并结合土堡在犁体曲面上快速翻转设计要求,在确保导曲线总高度较小前提下,增强翻堡性能并降低土堡侧抛距离,因此犁铧安装角度 α 越大,碎土性能越好,但阻力增大,考虑到本设计犁铧功能为切土和抬堡,因此取值 28° ;始端直线 l_{AB} 对应犁铧部分,仅对土堡起导向作用,不具备翻堡功能,因此取较小值 13 cm;抛物线开度 l 越小,翻堡速度越快,因此取较小值 15 cm;抛物线高度 h_1 决定土堡抬升幅度和翻转角度, h_1 越大,土堡翻转角度越大,因此取较大值 25 cm;圆弧线 CD 作为导曲线末端,对应的犁翼赋

予土堡侧抛的动能,圆弧线高度 h_2 越大,侧抛距离越远,因此取较小值 10 cm。将上述取值代入式(3)可得: k 为 0.53; a 为 1.61×10^{-2} ; b 为 0.50; c 为 7.43; h 为 31.11 cm; r 为 26.49 cm。

元角线变化规律将直接决定犁体曲面翻土和碎土性能,翻土性能是影响埋茬率的重要影响因素^[18],因此选用适用于黏重土壤且翻土性能较好的半螺旋型犁体曲面,该曲面犁胸部分元线角增长缓慢,犁翼部分元线角增长较快。

为提高犁体入土性能和降低犁铧阻力,选取始端元线角 θ_0 为 35° ;为提高犁体翻土性能,选取 $\Delta\theta$ 为 15° ,即末端元线角 θ_d 为 50° 。半螺旋型曲面元线角变化规律近似为抛物线,因此元线角与犁体高度关系式为

$$\theta = \begin{cases} \theta_0 & (0 < z \leq z_1) \\ d(z - z_1)^2 + \theta_0 & (z_1 < z < z_3) \end{cases} \quad (4)$$

式中 d ——常数

由图 6 可知, $z_1 = l_{AB} \sin \alpha$,代入 $\alpha = 28^\circ$ 以及 $l_{AB} = 13$ cm,得到 $z_1 = 6.10$ cm。将 $\theta_d = 50^\circ$ 、 $\theta_0 = 35^\circ$ 、 $z_3 = h_1 + h_2 + z_1$ 代入式(4)得到 $d = 1.22 \times 10^{-2}$ 。元线角变化规律如图 7 所示。

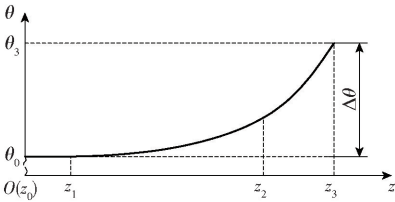


图 7 元线角变化规律示意图

Fig. 7 Schematic of original line angle variation

2.1.4 犁体曲面翻堡过程分析

由于土壤机械特性较为复杂,在分析土壤翻堡过程时,取连续堡条一段土堡作为研究对象,并作如下假设:①土堡为各向同性材料。②土堡为长方体,高度与耕深一致,宽度与耕宽一致。③犁体与土堡互动阶段时,土堡紧贴犁体曲面。

根据土堡在犁体不同位置的运动状态,如图 8 所示,可将土堡运动过程分为 3 个阶段:①犁铧对土堡抬升阶段。②土堡越过犁铧后沿犁体曲面上升和翻转阶段。③土堡离开犁面后抛物运动阶段。在分析 3 个阶段时,以土堡为研究对象,定义土地为静参考系,犁体为动参考系。

(1)犁铧对土堡的抬升阶段。犁铧切土和抬土时,土堡的运动为上升运动,因此对土堡受力分析如图 9 所示。其中: AI 为土堡运动起始点相对轨迹的切线; θ 为犁铧处元线角; ζ 为 z 轴和相对轨迹切线 AI 在平面 xOz 上投影线之间的夹角; η 为切线 AI 与

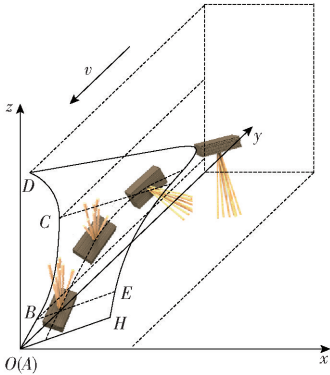


图 8 土堡运动过程

Fig. 8 Soil movement process

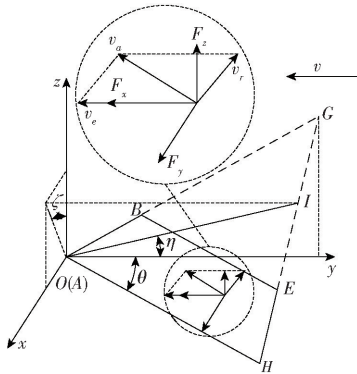


图 9 土堡在进入犁铧时的受力情况

Fig. 9 Soil stress conditions upon entering plowshare

y 轴之间的夹角。

土堡与犁铧互动过程,可看作犁铧对土壤冲击后挤压剪切并向上抬升的过程^[20]。

冲击挤压作用的结果是土堡压缩变形,而压缩程度与多种因素有关,包括犁铧安装角、初始元线角、犁体前进速度、犁铧与土堡摩擦系数、土壤容重等,这些因素造成的结果表现在土堡运动状态上是不同牵连速度下相对速度的差异,包括相对速度大小以及和牵连速度在空间中夹角,参照文献[19],土堡压缩系数可表示为

$$\psi = \frac{v_r}{v_e} \quad (5)$$

式中 ψ ——土堡压缩系数

v_e ——土堡牵连速度,即犁体前进速度, m/s

v_r ——土堡相对速度, m/s

土堡进入犁铧时受力情况可看作犁铧平面对土堡撞击,为了求出土堡受的动压力 F ,通过动量变化规律可得

$$F = \frac{dm}{dt} v_a \quad (6)$$

式中 $\frac{dm}{dt}$ ——单位时间内进入犁铧的土壤质量, kg

v_a ——土堡进入犁铧后绝对速度, m/s

由式(6)可知,土堡在坐标轴方向受力为

$$\begin{cases} F_x = \frac{dm}{dt}v_{ax} \\ F_y = -\frac{dm}{dt}v_{ay} \\ F_z = \frac{dm}{dt}v_{az} \end{cases} \quad (7)$$

式中 F_x ——土堡在 x 方向上受力, N
 F_y ——土堡在 y 方向上受力, N
 F_z ——土堡在 z 方向上受力, N
 v_{ax} ——土堡在 x 方向上绝对速度, m/s
 v_{ay} ——土堡在 y 方向上绝对速度, m/s
 v_{az} ——土堡在 z 方向上绝对速度, m/s

单位时间 dt 进入犁铧土堡质量为

$$\frac{dm}{dt} = \frac{a_1 b_1 \theta}{g} \frac{dy}{dt} = \frac{a_1 b_1 \theta}{g} v_e \quad (8)$$

式中 a_1 ——犁铧耕宽, cm

b_1 ——耕深, cm

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

结合土堡压缩系数、犁体前进速度、土堡与犁铧摩擦因数、犁铧入土角和安装角, 可得土堡绝对速度为

$$v_a = v_e \sqrt{1 + \psi^2 - 2\mu \cos \eta} \quad (9)$$

式中 μ ——土堡与犁铧的摩擦因数

将式(9)中 v_a 投影到坐标轴上可得

$$\begin{cases} v_{ax} = \psi v_e \sin \zeta \sin \eta \\ v_{ay} = v_e (\psi \cos \zeta - 1) \\ v_{az} = \psi v_e \cos \zeta \sin \eta \end{cases} \quad (10)$$

将式(8)~(10)代入式(6)~(7)可得

$$F = \frac{a_1 b_1 \theta}{g} v_e^2 \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \eta} \quad (11)$$

$$\begin{cases} F_x = \psi \frac{a_1 b_1 \theta}{g} v_e^2 \sin \zeta \sin \eta \\ F_y = \frac{a_1 b_1 \theta}{g} v_e^2 (\psi \cos \eta - 1) \\ F_z = \psi \frac{a_1 b_1 \theta}{g} v_e^2 \cos \zeta \sin \eta \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)、(12)可知, 土堡与犁铧互作过程受力的大小与方向主要由土堡牵连速度(犁体前进速度)、土堡相对轨迹切线与 y 轴夹角(由犁铧安装角与入土角决定)和土堡压缩系数决定。

(2)沿犁体曲面上升和翻转阶段。结合牵连速度 v_e 大小与方向保持不变, 绝对速度 v_a 变化主要由相对速度 v_r 变化导致。因此在犁胸阶段分析土堡相对速度变化的问题。

如图 10 所示, 假设质量为 m 的土堡沿犁壁在 Δt 时间内绝对速度由 v_{a1} 变化为 v_{a2} , 由动量守恒

可得

$$F \Delta t = m(v_{a2} - v_{a1}) \quad (13)$$

式中 F ——土堡受力, N

Δt ——土堡运动单位时间, s

v_{a2} ——土堡微元在单位时间后速度, m/s

v_{a1} ——土堡微元初速度, m/s

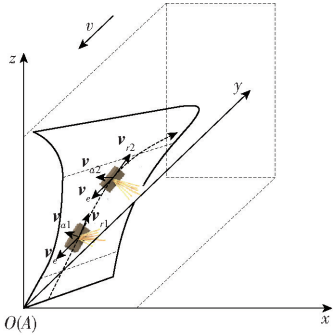


图 10 土堡沿犁壁运动示意图

Fig. 10 Diagram of dirt movement along plow wall

而 v_{a2} 、 v_{a1} 与牵连速度 v_e 之间可建立方程为

$$\begin{cases} v_{a2} = v_e + v_{r2} \\ v_{a1} = v_e + v_{r1} \end{cases} \quad (14)$$

式中 v_{r1} ——土堡微元初始相对速度, m/s

v_{r2} ——土堡微元在单位时间后相对速度, m/s

v_e ——土堡微元牵连速度, m/s

将式(14)代入式(13)可得

$$F = m \frac{v_{r2} - v_{r1}}{\Delta t} = m \frac{\Delta v_r}{\Delta t} \quad (15)$$

当 Δt 趋近于零, 则得

$$F = m \frac{dv_r}{dt} = ma_r \quad (16)$$

式中 a_r ——土堡微元相对加速度, m/s^2

由式(16)可知, 造成土堡沿犁壁翻转的力主要取决于土堡相对速度 v_r 变化, 结合式(1)、(4)可知, 导致相对速度发生变化的是土堡在犁体表面上的运动过程因元线角增加和导曲线曲率变化所造成。

(3)土堡离开犁壁后抛物运动阶段。土堡离开犁壁后到落地阶段仅受重力作用, 因此建立该阶段土堡运动微分方程为

$$\begin{cases} \frac{md^2x}{dt^2} = 0 \\ \frac{md^2y}{dt^2} = 0 \\ \frac{md^2z}{dt^2} = -mg \end{cases} \quad (17)$$

对式(17)进行积分时, 积分常数需从土堡运动初始条件求出, 即当 $t = 0$ 时, 结合式(10)积分后的运动方程为

$$\begin{cases} x = \psi v_e \sin \zeta \sin \eta t \\ y = v_e (\psi \cos \zeta - 1) t \\ z = \psi v_e \cos \eta \sin \zeta t - g t^2 / 2 \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)描述的运动消去 t 和 v_e 可得土堡运动轨迹在 xOy 和 xOz 平面投影方程为

$$y = \frac{\psi \cos \zeta - 1}{\psi v_e \sin \zeta \sin \eta} x \quad (19)$$

$$z = \frac{x}{\tan \zeta} - \frac{g x^2}{2 \psi^2 v_e^2 \sin^2 \zeta \sin^2 \eta} \quad (20)$$

得到土堡运动轨迹如图 11 所示。

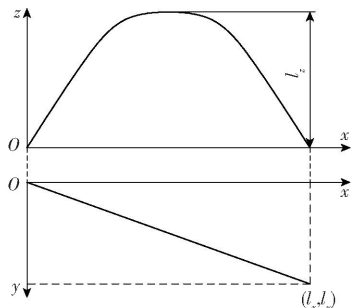


图 11 土堡位移投影图

Fig. 11 Ground subsidence displacement projection map

由土堡运动轨迹方程结合图 11 可得知,土堡在三轴方向上最大运移距离为 l_x 、 l_y 、 l_z ,由式(18)可得

$$\begin{cases} l_x = \frac{v_r^2}{g} \sin \zeta \cos \eta \\ l_y = v_e \frac{2 v_r}{g} \sin \zeta \cos \eta \\ l_z = \frac{v_r^2}{g} \sin^2 \zeta \cos^2 \eta \end{cases} \quad (21)$$

根据表 1 可知土堡相对速度 v_e (机组前进速度),根据式(5)土壤压缩系数结合 v_e 可知 v_r 取值,由于 ζ 和 η 在土堡过程非固定值,参照文献[18-19]可知 ζ 为 $20^\circ \sim 70^\circ$, η 为 $10^\circ \sim 30^\circ$,基于上述参数范围计算得土堡在三轴方向最大位移为:
 $l_x = 0.213 \text{ m}$, $l_y = 0.473 \text{ m}$, $l_z = 0.197 \text{ m}$ 。

2.2 分堡制垄装置与旋耕刀排布协同设计及参数分析

犁组对稻茬地翻堡作业后,厢面呈 6 条堡状结构,为了将其均匀分为 6 个微垄,设计了一种分堡制垄装置配合旋耕装置实现初步制微垄。旋耕刀转动时将土壤向后方抛送,由 5 个分堡制垄装置将抛送的土壤分为初步的微垄,配合作业示意图如 12 所示。由于犁翻后种床不平整,因此在沿用传统的双头螺旋线和人字形排列方式的基础上,调整左右弯刀排布,使犁翻后不平整种床被旋耕刀抛送并均匀分为 6 个微垄。

旋耕装置采用中间传动方式。旋耕刀采用对称

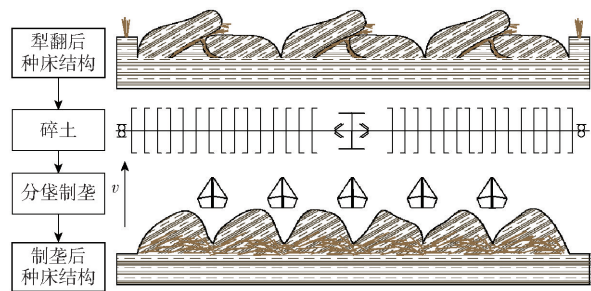


图 12 犁旋配合分堡制垄作业示意图

Fig. 12 Integrated plow-ridge schematic

双头螺旋人字形对称排列方式,左右刀辊均安装 30 把刀片,每个回转平面内两刀座夹角为 180° ,其中螺旋线轴向相邻两刀座夹角 70° ,为保证碎土后种床厚度满足油菜直播要求,参考 GB/T 5669—2017《旋耕机械 刀与刀座》,选用 II T235 型旋耕刀。

旋耕刀辊转动时,单个旋耕刀由前向后切削土壤并往侧后方抛送,侧抛方向取决于旋耕刀的弯折方向。旋耕刀排布如图 13 所示,在旋耕刀辊上划分出 6 个区域。I、II、V、VI 4 个区域采用左右弯刀组合排列,区域左侧安装右弯刀、区域右侧安装左弯刀,工作时旋耕刀将土壤往中间抛送。因变速箱配置于旋耕装置中部,且变速箱前方安装小犁将土壤向两侧运移,为防止作业时变速箱后方土壤量较少,因此区域 III 安装右弯刀,将土壤往右后方抛送,同理区域 IV 安装左弯刀。区域 I 右侧配置 4 把左弯刀,区域 II 左侧配置 4 把右弯刀,为避免区域 I 和 II 之间出现漏耕区域,将两区域接壤处的回转平面配置 1 把左弯刀和右弯刀,其余接壤区域同理。

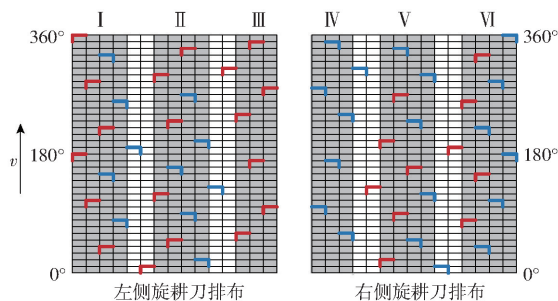


图 13 旋耕刀排布示意图

Fig. 13 Illustration of arrangement of tilling blades

如图 14 所示,分堡制垄装置由分堡部件和挡土部件组成。旋耕刀将土壤向后方抛送时,土壤落入制垄区或者与挡土部件、分堡部件碰撞;落入制垄区土壤直接到达指定的微垄位置;抛送至挡土部件的土壤经碰撞进一步破碎后掉落至制垄区;抛送至分堡部件的土壤被分土板分开至两侧制垄区。护土板防止土壤回流至垄沟。

由于作业工况为稻茬地,因此分土部件需满足防挂草和防堵土。对分土部件处物料(土壤和水稻

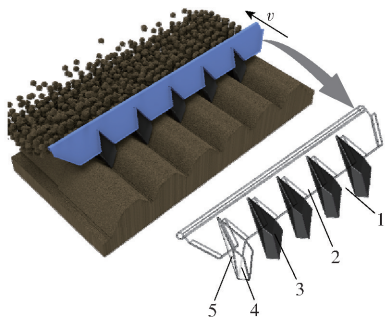


图 14 分垡制垄装置结构示意图

Fig. 14 Ridge-forming device schematic

1. 制垡区 2. 挡土部件 3. 分垡部件 4. 护土板 5. 分土板

秸秆) 进行受力分析,如图 15 所示,分土棱线与前进行方向夹角为 θ_s ,随机具前进同时,物料受到前方土壤阻力 F_t 、受分土部件的压力 F_s ,将所受力沿分土棱边进行分解可得物料在分土部件处发生滑移的临界条件为

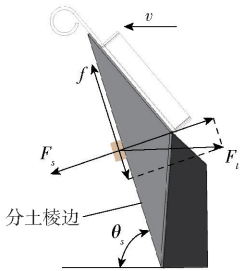


图 15 分垡制垄装置受力分析图

Fig. 15 Stress analysis diagram of land division and micro-ridge setting device

$$\begin{cases} F_t \sin \theta_s = F_s \\ f < \mu_1 F_t \sin \theta_s \end{cases} \quad (22)$$

式中 μ_1 ——物料与分土部件的摩擦因数

f ——物料所受摩擦力, N

整合式(22)得到夹角 θ_s 与摩擦因数 μ_1 的关系为

$$\tan \theta_s < \mu_1 \quad (23)$$

由于此处物料为土壤和水稻秸秆,因此为钢-土壤和钢-水稻秸秆之间的摩擦因数,分别为 0.482 和 0.3^[21],代入式(23)可得秸秆发生滑移的 θ_s 临界值为 25.74°,土壤发生滑移的 θ_s 临界值为 16.71°,因此 θ_s 应小于 16.71°,取整为 16°。

2.3 微垄整形牙辊设计

通过旋耕刀将土壤后抛,经过分垡制垄装置初步制垄作业后,垄体存在松散、不规整等现象,易导致垄体坍塌、落种位置不明确等问题,因此设计了一种配置于分垡制垄装置后方的微垄整形牙辊对垄体进行主动滚压以提高垄体紧实度和一致性。

2.3.1 微垄整形牙辊主要结构与工作原理

微垄整形原理如图 16 所示,分垡制垄装置初步制出形状不规则的微垄后,微垄整形牙辊滚压

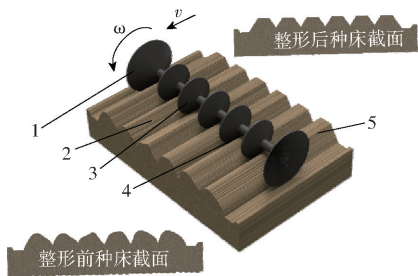


图 16 微垄整形示意图

Fig. 16 Schematic of micro-ridge shaping

1. 畦沟整形圆盘 2. 整形前微垄 3. 垄沟整形圆盘 4. 垄顶整形圆筒 5. 整形后微垄

土壤修饰种床,其中微垄整形牙辊各部分修饰的对象为:畦沟整形圆盘将畦沟内散落的土壤挤压至垄壁上;垄沟整形圆盘将微垄的垄壁挤压紧实,避免垄体坍塌后土壤滑落至垄沟,导致垄沟种子覆土过厚降低出苗率;垄顶整形圆筒将微垄顶修饰平整,以保证种子能停留在垄顶,避免因垄顶不平整而滑落至垄沟。整形后的种床特征为 6 个等腰梯形状的微垄结构。微垄整形牙辊结构参数直接影响微垄和畦沟几何尺寸,根据微垄剖面几何参数和油菜直播作业畦沟参数要求,对微垄整形牙辊结构参数进行设计。

2.3.2 微垄整形牙辊结构参数设计

根据弹性塑力学理论可知,土壤受外力作用发生的变形为体积变化和形状变化。由于土壤为各向异性材料,且力学性质复杂,为简化分析,忽略土壤颗粒内聚力、范德华力、库伦力等相互作用力。建立的垄体整形前后截面示意图如图 17 所示,虚线为整形前厢面横截面,粗实线为整形后厢面横截面,2 个横截面土壤量相等,但坚实度不一致。设整形前厢面横截面面积为 A_1 ,由耕整部件工作幅宽、入土深度结合碎土后土壤膨胀系数 k_2 决定;耕整部件包括翻土犁组、旋耕碎土装置和开畦沟犁组,工作幅宽 l_a 为 230 cm;参照油菜合理种床制备要求^[13],耕作最大深度 h_a 设计为 20 cm。设整形后横截面积为 A_2 ,结合土壤膨胀系数和滚压整形后土壤压缩系数 k_1 可得

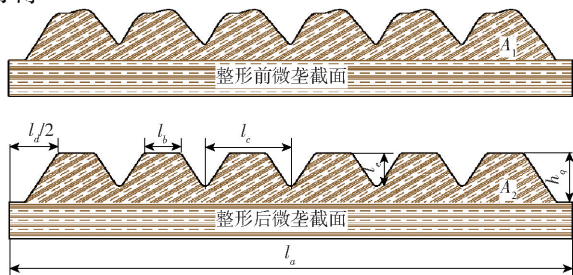


图 17 垄体整形前后截面示意图

Fig. 17 Diagram showing cross-section before and after micro-ridge shaping

$$\begin{cases} k_1 A_1 = A_2 \\ A_1 = k_2 l_a h_a \\ A_2 = h_q [5l_c + l_b + h_q(l_c - l_b)/l_e] - 3l_e(l_c - l_b) \end{cases} \quad (24)$$

式中 l_c ——微垄底宽,cm
 l_b ——微垄顶宽,cm
 l_d ——畦沟宽度,cm
 l_e ——微垄高度,cm
 h_q ——畦沟深度,cm

基于土壤回流、垄顶需落种等方面考虑:设计微垄底宽 l_c 为 35 cm;微垄高度 l_e 为 15 cm;为使种子从导种管导出后能顺利落种至垄顶,将垄顶宽度 l_b 设计为 15 cm;参考《农业机械设计手册》,土壤压缩系数 k_1 为 0.77,旋耕碎土后土壤膨胀系数 k_2 为 1.3。将上述参数代入式(24),得畦沟深度 h_q 为 24.9 cm。将以上参数对应到微垄整形牙辊如图 18 所示,其中包括几何关系有

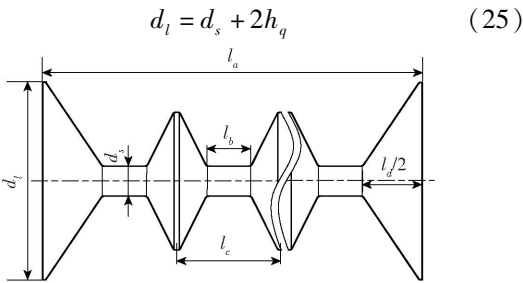


图 18 微垄整形牙辊结构参数图

Fig. 18 Diagram of structural parameters of micro-ridge adjustment teeth

回转半径和转速是影响微垄整形牙辊转矩的关键参数。半径过小时:厢面与微垄整形牙辊表面单位时间内接触的面积较小,整形效果不佳,垄形一致性较差;半径过大时:所需力矩增大,动力需求增加,整机质量上升导致重心后移。选取恰当的回转半径是保证微垄整形牙辊与厢面充分接触的关键,参考起垄整形镇压辊最小回转半径为 80 mm 时,垄体质量较好,因此确定垄顶整型圆筒直径 d_s 为 160 mm。

2.3.3 转速关系确定与传动比设计

机具前进速度、旋耕刀组转速、微垄整形牙辊转速、垄顶整形圆筒直径、垄沟整形圆盘直径等都是影响垄体质量的重要因素。微垄整形牙辊作业时,垄顶整形圆筒和垄沟整形圆盘圆周运动线速度应大于机具前进速度,以避免相对于土壤向后滑动,防止土壤被微垄整形牙辊向前拱动,降低整形后微垄一致性,因此微垄整形牙辊转速需满足

$$\omega R \geq v \quad (26)$$

式中 ω ——微垄整形牙辊转动角速度,rad/s

R ——微垄整形牙辊回转半径,mm
 v ——机具前进速度,m/s

由图 18 可知,微垄整形牙辊回转半径包括垄顶整形圆筒回转半径 R_1 、垄沟整形圆盘回转半径 R_2 和畦沟整形圆盘回转半径 R_3 ,各回转半径与微垄整形牙辊结构参数关系为

$$\begin{cases} R_1 = \frac{d_s}{2} \\ R_2 = \frac{d_s}{2} + l_e \\ R_3 = \frac{d_l}{2} \end{cases} \quad (27)$$

在同一转速下具有不同线速度,其中垄顶整形圆筒回转半径 R_1 最小,当 R_1 满足式(27)时,微垄整形牙辊工作中不会相对于土壤向后滑动,由此可得

$$\frac{n_1}{v} \geq \frac{60}{2\pi R_1} \quad (28)$$

式中 n_1 ——微垄整形牙辊转速,r/min

油菜微垄种植对微垄垄形一致性要求较高,微垄整形牙辊需与厢面充分接触,并相对于土壤向前滑动以实现整形效果,因此微垄整形牙辊转速与机具前进速度比值为

$$\frac{n_1}{v} = \frac{60}{\pi R_1} \quad (29)$$

机具前进速度不仅约束微垄整形牙辊转速,也是设计旋耕刀组转速的重要因素。旋耕刀运动是机具前进运动和旋耕刀绕刀轴做圆周运动的复合运动,运动轨迹为余摆线,切土节距为

$$l_s = \frac{60v}{n_2 Z} \quad (30)$$

式中 l_s ——旋耕刀切土节距,mm

n_2 ——旋耕刀轴转速,r/min

Z ——旋耕刀轴同一回转平面内刀片数,把

针对不同作业工况及不同农艺要求,选用不同切土节距。如耕整中等黏性土壤麦田、大豆地等,通常选用切土节距 90 ~ 110 mm;耕整含水率 35% 以上稻茬地,通常选用切土节距 60 ~ 90 mm^[18]。油菜微垄种床制备对碎土率要求较高,选择切土节距为 40 ~ 60 mm。旋耕刀轴转速与机具前进速度之间的关系式由式(29)整理为

$$\frac{n_2}{v} = \frac{60}{Zl_s} \quad (31)$$

结合式(29)、(31)可得微垄整形牙辊转速 n_1 和旋耕刀轴转速 n_2 之间关系表达式为

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Zl_s}{\pi R_1} \quad (32)$$

结合式(27)、(32),并代入相关参数后得到微

垄整形牙辊转速 n_1 和旋耕刀轴转速 n_2 之比为 $0.32 \sim 0.48$ 。

稻茬地油菜微垄精量联合直播机传动系统如图 19 所示。拖拉机 PTO 连结中央齿轮箱动力输入轴, 经一级链条传动单元与传动轴连接, 传动轴两侧经二级链条传动单元将动力传递给微垄整形牙辊对微垄进行滚压整形。

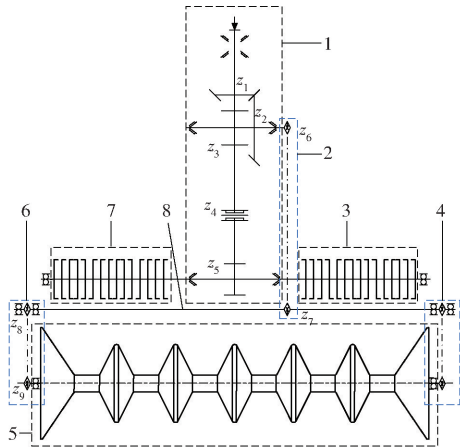


图 19 稻茬地油菜微垄精量联合直播机传动系统示意图

Fig. 19 Schematic of transmission system for precision

combined seeder of rapeseed rape on stubble fields

1. 中央齿轮箱 2. 一级链条传动单元 3. 右侧旋耕刀组 4. 6. 二级链条传动单元 5. 微垄整形辊 7. 左侧旋耕刀组 8. 传动轴

旋耕刀轴与传动系统动力输入轴传动比为

$$i_1 = \frac{z_1 z_3 z_4}{z_2 z_4 z_5} \quad (33)$$

式中 $z_1 \sim z_5$ ——中央齿轮箱各齿轮齿数

微垄整形牙辊与传动系统动力输入轴传动比为

$$i_2 = \frac{z_1 z_6 z_8}{z_2 z_7 z_9} \quad (34)$$

式中 z_6, z_7 ——一级链条传动单元中链轮齿数

z_8, z_9 ——二级链条传动单元中链轮齿数

整合式(33)、(34)可得微垄整形牙辊与旋耕刀轴转速比为

$$i_3 = \frac{z_5 z_6 z_8}{z_3 z_7 z_9} \quad (35)$$

选配中央齿轮箱各齿轮齿数为: $z_1 = 15$ 、 $z_2 = 23$ 、 $z_3 = 13$ 、 $z_4 = 35$ 、 $z_5 = 17$, 一级链条传动单元中链轮齿数分别为: $z_6 = 19$ 、 $z_7 = 35$, 二级链条传动单元中链轮齿数分别为: $z_8 = 19$ 、 $z_9 = 35$ 。最终确定 $i_1 = 0.5$ 、 $i_2 = 0.19$ 、 $i_3 = 0.39$ 。

2.3.4 微垄整形牙辊受力分析

微垄整形牙辊采用主动驱动对厢面进行滚压, 受力分析如图 20 所示。在微垄整形牙辊工作过程, 受重力 G 、前进方向反向的阻力 F_1 和转矩 M_2 的作

用。在微垄整形牙辊与土壤最初接触处(图 20 中放大部分), 存在前进阻力 r_x 、土壤推力 P 及支持力 r_y , 由此可得

$$\begin{cases} F_1 + r_x = P \\ G = r_y \\ M_2 + r_x r_2 = M_1 + r_1 P + r_y r_3 \end{cases} \quad (36)$$

式中 r_3 ——垂直动力半径, mm

r_2 ——水平动力半径, mm

M_1 ——微垄整形牙辊摩擦阻力转矩, $N \cdot m$

r_1 ——垄顶整形圆筒半径, mm

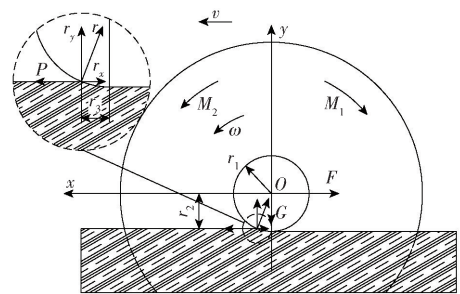


图 20 微垄整形牙辊受力分析图

Fig. 20 Micro-ridge shaping roller stress analysis diagram fields

微垄整形牙辊对厢面滚压后会增加垄体坚实度, 但考虑土壤坚实度系数为 0.9, 滚压前后垄顶高度变化并不显著, 因此在理论计算时假设 r_1 与 r_2 相等, 代入式(36)可得

$$P = \frac{M_2}{r_1} + r_x - G - \frac{M_1}{r_1} \quad (37)$$

由式(37)可知, 土壤对微垄整形牙辊推力 P 与水平牵引力不相等。由于微垄整形牙辊采用主动滚压工作方式, 且存在与土壤接触处相对于前进方向向前的速度, 由于微垄整形牙辊受机组前进速度的影响, 导致整形圆盘外圆相对于厢面转动的路径小于自身转动的距离。根据刚体与土壤互作分析^[22], 土壤对驱动式镇压辊法向作用力与水平面夹角随转速增加而减小、切向作用力方向不变, 该现象与上述分析结果一致。

3 田间试验

3.1 试验条件

为验证犁组埋茬效果和微垄联合精量直播机作业性能, 于 2024 年 9 月 20 日在华中农业大学现代农业示范基地(工况 1)开展犁组埋茬试验, 于 2024 年 10 月 9 日在湖北省荆门市屈家岭管理区(工况 2)开展整机性能试验。试验田块均常年采用稻油轮作模式, 作业工况均为水稻收获后留茬田块, 土壤质地均为黏性土壤, 试验前田块工况如表 2 所示。

表 2 试验田块工况参数
Tab.2 Working condition parameters of test field

工况	试验类型	土壤平均含水率/%	土壤平均坚实度/kPa	平均留茬高度/mm	秸秆量/(g·m ⁻²)	秸秆含水率/%
1	翻垡类铧犁组埋茬试验	27.61	1 732	365	1 015	32.57
2	微垄精量联合直播机作业性能	26.53	1 624	256	875	35.24

犁组埋茬试验和微垄精量联合直播机性能试验配套动力分别为雷沃 1004 型和东方红 954 型拖拉机。

3.2 试验方法

为验证犁组翻垡埋茬效果,制作犁组并进行田间试验(图 21)。将犁组挂接于雷沃 1004 型拖拉机,调节拖拉机后悬挂高度和上拉杆长度,使犁耕深度为 180 ~ 200 mm;通过调节拖拉机挡位和手油门位置,使机组作业速度为 5 km/h。机组作业距离为 50 m,去掉行程始末端各 5 m,选取中间 40 m 为测量区域,试验重复 3 次,参照文献[23],确定以平均耕深、耕深稳定性系数、土垡翻转程度为评价指标。其中土垡翻转后其留茬表面与未耕地表夹角小于 90°为翻垡,90°~100°为立垡,大于 100°为回垡,翻垡率计算式为

$$r_f = \frac{L - (L_h + L_l)}{L} \times 100\%$$
 (38)

式中 r_f ——翻垡率,%
 L ——测量区域长度,cm
 L_h ——回垡长度,cm
 L_l ——立垡长度,cm



图 21 犁组翻垡埋茬试验

Fig. 21 Plowing group tillage and residue burying experiment

为验证微垄精量联合直播机埋茬制垄装置作业性能,进行田间试验(图 22)。试验前调节拖拉机上拉杆长度、液压手柄位置、犁柱高度等,保证犁组入



图 22 稻茬地微垄联合精量直播机田间试验

Fig. 22 Field trials of micro-ridge combined precision seeders in rice stubble fields

土深度为 180 ~ 200 mm、旋耕刀入土深度为 100 ~ 120 mm。调节拖拉机挡位和手油门位置,使机组作业速度为 5 km/h,拖拉机 PTO 转速为 540 r/min。机组试验面积 0.2 hm²,随机选取 3 处连续作业 40 m 行程为测量区域,参照文献[24 - 26],结合油菜微垄种植农艺要求,确定试验以埋茬率、平均耕深、耕深稳定性系数、碎土率、畦沟宽度、畦沟深度、微垄沟间距、微垄高度、微垄顶宽度为评价指标。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 翻垡类铧犁组埋茬试验

翻垡类铧犁组在稻茬田工况下作业性能较好,试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,犁组平均耕深为 188 ~ 195 mm,满足耕深 180 ~ 200 mm 设计范围;耕深稳定性系数不小于 85.29%,表明犁组作业稳定性较好;翻垡率不小于 80.19%,表明犁组在稻茬地工况下翻垡性能较好。

表 3 翻垡类铧犁组田间试验结果

Tab.3 Field test results of reversible furrow plough group

试验指标	试验组号	数值
平均耕深/mm	1	188
	2	192
	3	195
耕深稳定性系数/%	1	85.35
	2	85.29
	3	86.03
翻垡率/%	1	81.25
	2	80.19
	3	82.86

3.3.2 整机性能试验

微垄精量联合直播机在稻茬田工况下种床耕整质量较好,作业后各评价指标如表 4 所示。

试验结果表明,稻茬地油菜微垄精量联合直播机作业后埋茬率不小于 80.32%、碎土率不小于 81.69%、畦沟宽度小于 350 mm、畦沟深度大于 230 mm;耕深为 187 ~ 192 mm,满足耕深 180 ~ 200 mm 的设计范围,且耕深稳定性系数不小于 85.08%;微垄高为 146 ~ 149 mm,微垄高稳定性系数不小于 83.73%;微垄底宽为 348 ~ 352 mm,微垄底宽稳定性系数不小于 85.33%;微垄顶宽为 121 ~ 128 mm,微垄顶宽稳定性系数不小于 80.33%。该机具可实现稻茬地埋茬、碎土、开畦沟、制微垄和种

表 4 微垄精量联合直播机埋茬制垄装置田间试验结果

Tab.4 Field test results of precision combined seeder for micro-ridge farming

参数		区域 1	区域 2	区域 3
埋茬率	均值/%	80.32	81.25	80.33
	稳定性系数/%	81.69	82.93	82.31
碎土率	均值/mm	335	342	347
	稳定性系数/mm	245	238	231
畦沟宽度	均值/mm	192	191	187
	稳定性系数/mm	148	146	149
畦沟深度	均值/mm	84.32	84.91	83.73
	稳定性系数/%	351	348	352
耕深	均值/mm	86.12	85.86	85.33
	稳定性系数/%	125	128	121
微垄高度	均值/mm	81.25	80.33	81.86
	稳定性系数/%			
微垄底宽度	均值/mm			
	稳定性系数/%			
微垄顶宽度	均值/mm			
	稳定性系数/%			

肥播施等多道工序,各项试验指标满足 DB42/T 1312—2017《稻茬地油菜直播机械化耕整地技术规程》^[28]和 DB42/T 1587—2020《合理耕层构建的水旱轮作耕整作业技术规程》^[27]以及微垄制备要求^[2,29]。油菜出苗情况如图 23 所示。

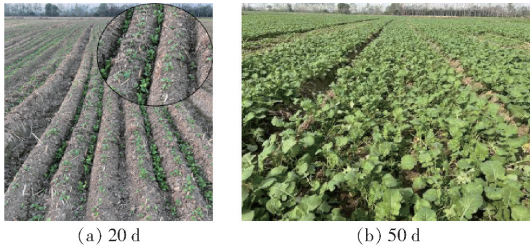


图 23 油菜出苗及长势

Fig.23 Rapeseed seedling emergence and growth chart

在整机性能试验过程发现,机组前进速度稳定时,机具各装置运行稳定且作业质量满足稻茬地油菜微垄种床制备要求。含水率较大时,犁面粘黏土壤较多,影响耕深稳定性。

4 结论

(1)提出了“犁翻埋茬+旋耕抛土分垄+主动滚压修饰垄型”的微垄种床制备工艺,研制了稻茬地油菜微垄精量联合直播机埋茬制垄装置。

(2)设计了犁体曲面,分析了土垡在曲线上的运动过程,建立了土垡各运动阶段的数学模型,得到土垡在三轴方向最大位移分别为: $l_x=0.213\text{ m}$, $l_y=0.479\text{ m}$, $l_z=0.197\text{ m}$;设计了分垄制垄装置,并确定了旋耕刀排布配合分垄制垄装置作业;设计了微垄整形牙辊主动滚压以提高垄体坚实度和垄形一致性,基于微垄几何参数要求,确定了微垄整形牙辊结构参数,为保证微垄整型质量,理论计算并确定整形牙辊与旋耕刀轴转速比较优值为 0.39。

(3)田间试验结果表明:犁组平均耕深为 187~192 mm,耕深稳定性系数不小于 85.29%,翻垡率不小于 80.19%;整机埋茬率不小于 80.32%,碎土率不小于 81.69%,微垄高度、微垄底宽、微垄顶宽分别为 146~149 mm、348~352 mm、121~128 mm,稳定性系数分别不小于 83.73%、85.33%、80.33%。满足油菜微垄种床制备要求。

参 考 文 献

[1] Wang Xianling, El-Badri A M, Li Mengliang, et al. Micro-ridge-furrow soil moisture regulation technology improves seedling quality and yield of winter rapeseed[J]. Soil & Tillage Research,2024,237:105960.

[2] 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 Liming, 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)

[3] 李蒙良,王立宗,廖庆喜,等. 油菜机直播微垄种床制备过程旋耕后土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报,2023,39(20):10-19.

Li Mengliang, Wang Lizong, Liao Qingxi, et al. Calibration of rototilled soil discrete element parameters after rotary tillage in the preparation process of rapeseed mechanized direct seeding micro-ridge seed bed[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(20):10-19. (in Chinese)

[4] 刘晓鹏,张青松,肖文立,等. 稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):33-41.

Liu Xiaopeng, Zhang Qingsong, Xiao Wenli, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):33-41. (in Chinese)

[5] 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 matching machine for rototilling-tillage combined operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(5):40-43. (in Chinese)

[6] 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):52-55.

Jia Honglei, Ma Chenglin, Liu Feng, et al. Study on technology and matching machine for stalk/stubble breaking and mulching combined operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(11):52-55. (in Chinese)

[7] 孙文成,廖庆喜,张青松,等. 驱动犁翻与反转旋耕组合式油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报,2021,40(2):67-76.

Sun Wencheng, Liao Qingxi, Zhang Qingsong, et al. Design and field test of rapeseed direct-seeding seedbed preparation

- machine combined driving type disc ploughing with reverse rotary tilling[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2):67–76. (in Chinese)
- [8] Zhou Hua, Zhang Chunling, Zhang Wenliang, et al. Evaluation of straw spatial distribution after straw incorporation into soil for different tillage tools[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 104:440.
- [9] 廖宜涛, 李玥宾, 廖庆喜, 等. 油菜精量联合直播机覆秸装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5):52–62. Liao Yitao, Li Yuebin, Liao Qingxi, et al. Design and test of straw gather mulch device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5):52–62. (in Chinese)
- [10] 廖庆喜, 张季钦, 张青松, 等. 平行犁组翻扣与旋耕组合式油菜种床制备装置研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10):190–201. Liao Qingxi, Zhang Jiqin, Zhang Qingsong, et al. Design and test of rapeseed seed bed preparation device combined with parallel plow group turnbuckle and rotary tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10):190–201. (in Chinese)
- [11] 张银平, 杜瑞成, 刁培松, 等. 正反转组合式水稻宽苗带灭茬播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3):7–13. Zhang Yinping, Du Ruicheng, Diao Peisong, et al. Design and experiment of wide band seeding rice seeder with reversed stubble cleaning and anti-blocking[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3):7–13. (in Chinese)
- [12] 杜文斌, 周国威, 张青松, 等. 油菜直播组合式埋茬防堵装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5):60–70. Du Wenbin, Zhou Guowei, Zhang Qingsong, et al. Design and experiment of the anti-blocking device combined stubble burying for rapeseed direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(5):60–70. (in Chinese)
- [13] 燕恒, 魏国梁, 张青松, 等. 稻茬田油菜直播机组合式开种沟装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9):199–211. Yan Huan, Wei Guoliang, Zhang Qingsong, et al. Design and experiment of combined seed furrow opener for rapeseed direct seeder in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9):199–211. (in Chinese)
- [14] 廖庆喜, 卜祥利, 孙文成, 等. 构建油菜种床合理耕层的驱动型犁旋联合耕整机研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11):74–84. Liao Qingxi, Bu Xiangli, Sun Wencheng, et al. Development of driven plow rotary combined tillage machine for construction of rational tillage in rape seedbeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):74–84. (in Chinese)
- [15] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刀型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7):99–110, 195. Liao Qingxi, Xie Haoming, Zhang Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7):99–110, 195. (in Chinese)
- [16] 肖文芳, 舒彩霞, 廖庆喜, 等. 犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(6):139–146. Xiao Wenfang, Shu Caixia, Liao Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6):139–146. (in Chinese)
- [17] 魏国梁, 张青松, 刘立超, 等. 犁旋组合式油菜直播机扣袋装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6):38–46. Wei Guoliang, Zhang Qingsong, Liu Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):38–46. (in Chinese)
- [18] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
- [19] 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.
- [20] (苏)格亚捷夫 И. Б. 犁型曲面理论[M]. 李守仁, 译. 北京:中国工业出版社, 1964.
- [21] 廖庆喜, 林建新, 张青松, 等. 稻油轮作区铲锹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)
- [22] 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)
- [23] GB/T 14225.3—1993 铧式犁试验方法[S].
- [24] GB/T 5668—2008 旋耕机[S].
- [25] NY/T 499—2002 旋耕机作业质量[S].
- [26] NY/T 2709—2015 油菜播种机 作业质量[S].
- [27] DB42/T 1312—2017 稻茬地油菜直播机械化耕整地技术规程[S].
- [28] DB42/T 1587—2020 合理耕层构建的水旱轮作耕整作业技术规程[S].
- [29] 杜文斌, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁组阻力模型构建与通过性能分析[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9):188–198. Du Wenbin, Liao Qingxi, Liao Yitao, et al. Construction of resistance model and analysis of passability for shallow plow group of high-speed strip micro-ridge combined direct seeding machines for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9):188–198. (in Chinese)