doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.06.006

# 麦棉套作棉花套种精量播种机设计与试验

乔慧楠[1,2]　赵　岩[1,2]　马华章[1,2]　陈学庚[1,2]　田辛亮[1,2]　刘学虎[1,2]　李元超[1,2]

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003)

**摘要:** 针对我国黄河流域麦棉套作生产对棉花播种机的迫切需求,以及配套农机装备缺乏制约了麦棉套作技术规模化应用等问题,本文设计了一种棉花套种精量播种机,能够一次完成开沟、播种、覆土、镇压等多道作业工序,实现了麦棉套作棉花精量播种作业。针对麦棉套作模式下棉花播种作业要求,提出了播种机整机设计方案,确定了四杆仿形机构、开沟装置、播种装置、覆土装置、镇压装置等关键零部件结构参数。对整机纵向稳定性进行受力分析,计算结果表明机具设计满足稳定作业要求。对开沟过程进行离散元仿真模拟,分析开沟器前进速度和入土深度对土壤扰动的影响。开展田间试验,以作业速度、开沟深度、开沟器与穴播器水平间距为影响因素,播种合格率、漏播率为试验指标,设计三因素三水平正交试验,对棉花套种精量播种机播种性能进行验证。结果表明,当作业速度为 3.4 km/h、开沟深度为 45 mm、开沟器与穴播器水平间距为 360 mm 时,播种机播种合格率为 91.7%,漏播率为 0.64%,满足长江、黄河流域麦棉套作种植模式要求。

**关键词:** 麦棉套作; 棉花播种机; 四杆仿形; 开沟装置; 纵向稳定性

**中图分类号:** S226.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2026)06-0055-12　　**OSID:**

# Design and Test of Wheat and Cotton Intercropping Precision Seeder

QIAO Huinan[1,2]　ZHAO Yan[1,2]　MA Huazhang[1,2]　CHEN Xuegeng[1,2]　TIAN Xinliang[1,2]　LIU Xuehu[1,2]　LI Yuanchao[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shihezi* 832003, *China*)

**Abstract:** In response to the urgent demand for cotton sowing machinery in wheat-cotton intercropping production in the Yellow River Basin, and the limitations on large-scale application of wheat-cotton intercropping technology due to the lack of supporting agricultural machinery, a design of a precision cotton intercropping seeder was presented, which can complete multiple operations, including furrow opening, sowing, soil covering, and pressing in a single pass, achieving precise cotton sowing in wheat-cotton intercropping. Based on the sowing requirements of the wheat-cotton intercropping model, a complete seeder design scheme was proposed, and the structural parameters of key components such as the profiling mechanism, furrow opener, seeding device, soil covering device, and pressing device were determined. Stress analysis of the machine's longitudinal stability showed that the design met the requirements for stable operation. Discrete element simulation of the furrow opening process was conducted to analyze the effects of forward speed and soil entry depth on soil disturbance. Field trials were conducted, with operating speed, furrow depth, and the horizontal spacing between the furrow opener and the seed drill as influencing factors, and sowing qualification rate and missing rate as the experimental indicators. A three-factor, three-level orthogonal experiment was designed to validate the sowing performance of the precision cotton intercropping seeder. The results indicated that when the machine operated at a speed of 3.4 km/h, a furrow depth of 45 mm, and a horizontal spacing of 360 mm between the furrow opener and the seed drill, the sowing qualification rate reached 91.7% and the missing rate was 0.64%, meeting the requirements of wheat-cotton intercropping planting patterns in the

收稿日期: 2024-11-15　修回日期: 2025-03-02

**基金项目:** 新疆生产建设兵团英才支持计划青年项目(2023CB008-09)、国家棉花产业技术体系项目(CARS-15-24)、兵团财政科技计划项目(2025AA013)和江苏省重点研发(现代农业)项目(BE2020327)

**作者简介:** 乔慧楠(1999—),女,博士生,主要从事播种机械装备研究,E-mail: 1791809328@qq.com

**通信作者:** 赵岩(1983—),男,教授,主要从事棉花全程机械化研究,E-mail: zhaoyan@shzu.edu.cn

Yangtze and Yellow River regions.
**Key words**: wheat and cotton intercropping; cotton planter; four-bar profiling; trenching device; longitudinal stability

## 0 引言

黄河流域棉区土地肥沃、雨水充沛,满足棉花喜温好光、需水量大的生育特性[1],有利于棉花生长发育从而获得丰产[2]。随着我国人口数量的持续增长与经济的迅猛飞跃,土地资源日益变得紧缺,给粮食安全与棉花产业发展带来了前所未有的挑战与考验[3-4]。麦棉套作生产是传统的农业技术,该技术结合冬麦-春棉的生产规律,充分利用光、热、土地资源,发挥冬麦和春棉生产潜力,实现一年两熟,提高全年综合效益[5]。棉花播种是麦棉套作种植模式的重要工序[6],由于麦棉套作模式采用麦棉相间生长,棉花播种时在麦行内穿行作业,需尽量减小对小麦的损伤,常规棉花播种机械行走及作业均受到极大限制。

当前国内外有关棉花播种机械作业的研究较为深入,但针对麦棉套种模式跨行作业的棉花精量播种技术装备研究较少[7-8]。如曹秀振等[9]研究的垄间套播冬小麦免耕播种机,能够满足垄间(垄沟两侧)套播冬小麦的要求,但该机采用三点悬挂方式进行牵引作业,不适用于在小麦生长中后期的麦田内播种棉花,不能满足麦棉套作棉花播种作业要求。罗锡文院士团队[10]发明了一种跨垄深施肥套种机,适宜两端作业区和中间避让区作业,但不适合棉麦高垄低畦套作方式。鲁滨等[11]研制了 2BG-6 型麦田套种高架播种机,该机的显著特点是高地隙,但作业时没有配套的牵引机械,不能在较窄麦行内行进。

黄河流域适用于棉麦套作模式下的棉花播种机械与配套农机装备的缺乏,制约了麦棉套作技术的规模化应用,对麦棉套作技术推广产生了不利影响[12]。为此,针对黄河流域麦棉套作农艺生产技术,本文设计一款适用于麦棉套作模式下棉花跨行套种精量播种机[13],改造高地隙式喷雾机作为牵引装置,设计液压提升装置以实现垂直提升作业要求,一次作业可完成开沟、播种、覆土、镇压等多道工序,以期提升棉花套种的播种精度和生产效率。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 麦棉套作农艺模式

麦棉套作种植是指在小麦生长后期的行间播种棉花,小麦与棉花的共生期只占各自生育期的一小部分时间,同时能充分利用小麦与棉花不同生长时期的地上和地下空间,减少土地闲置和浪费,能合理解决麦棉间季节矛盾[14]。麦棉套作种植农艺模式为:在秋季前茬作物收获后及时进行耕整地,10 月 20 日前后进行小麦密植播种,播种宽度为 45 cm 带状条播或匀播,同时预留 45 cm 棉花播种行,棉花播种前正常进行麦田管理以及棉花预留行杂草清除、土壤疏松工作,小麦收获前 40 d 左右将棉花播种在预留行空地。麦棉套作农艺示意图如图 1 所示。

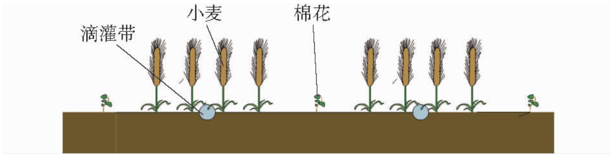


图 1 麦棉套作农艺模式示意图

Fig. 1 Schematic of wheat - cotton intercropping farming model

### 1.2 整机结构

麦棉套作棉花套种精量播种机作业环境特殊,需骑跨麦行在预留行内行进,目前市场上缺乏相适应的动力机械,因此棉花套种精量播种机需对动力机械进行改装设计,主要包括动力平台、牵引提升装置和播种单组等(图 2)。动力平台与牵引提升装置通过销轴固定,牵引机架连接在液压提升机构内框,可实现播种单组垂直提升和牵引的作业要求。每个播种单组采用仿形机构与横梁连接,实现独立仿形。

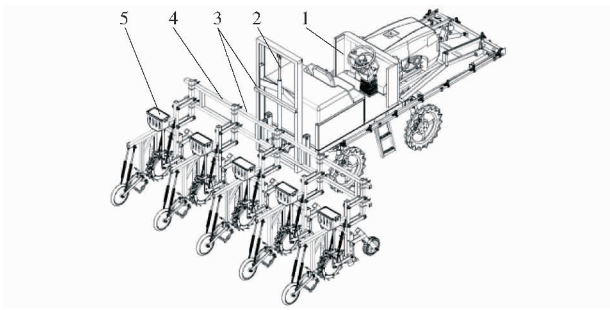


图 2 播种机结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of seeder

1. 动力平台 2. 液压提升机构 3. 牵引提升装置 4. 牵引横梁 5. 播种单组

### 1.3 工作原理

播种作业时,动力平台骑跨麦行在预留空行内行进,动力平台通过牵引提升装置给播种单组提供升降和牵引动力。限深轮控制播种单组作业深度,开沟装置开出宽 82 mm、深 50 mm 种沟,以保证后续播种顺利。棉种在种箱中经导种管进入穴播器存种室,由穴播器鸭嘴排出,链环式覆土装置和镇压轮进

行覆土镇压，从而完成整个播种作业[15]。播种单组由限深轮、开沟装置、播种装置、覆土器、镇压轮和机架等组成，如图 3 所示。

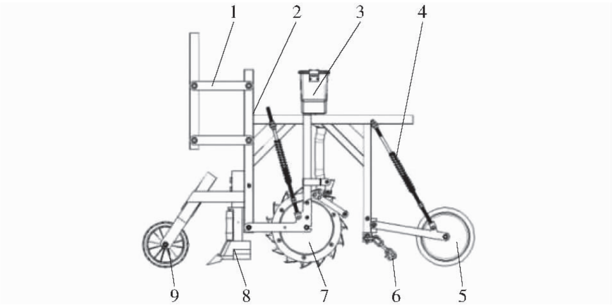


图 3　播种单组结构图

Fig. 3　Single-unit structure diagram of seeder

1. 仿形装置　2. 机架　3. 播种装置　4. 镇压弹簧　5. 镇压装置　6. 覆土装置　7. 穴播器　8. 开沟装置　9. 限深轮

### 1.4　主要技术参数

整机结构须符合长江、黄河流域棉区套种农艺要求，一次进地可完成开沟、播种、覆土和镇压等作业，并且可实现跨垄式作业。其中，棉花株距可通过更换穴播器调节块进行调节，调节范围为 9.5 ~ 19 cm。整机主要参数如表 1 所示。

**表 1　主要技术参数**

**Tab. 1　Main technical parameters**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 跨行高度/mm | ≤900 |
| 播种单组工作宽度/mm | 300 ~ 350 |
| 开沟深度/mm | 0 ~ 40 |
| 播种穴距/mm | ≥90 |
| 播种单组间距/mm | 760 ~ 900(可调) |
| 作业行数 | 3 或 5 |
| 穴粒合格率/% | ≥85 |
| 空穴率/% | ≤4 |

## 2　关键部件设计

### 2.1　牵引提升装置

设计了一种垂直升降的悬挂机构，其中升降系统包括外框架、内框架和升降液压缸等，播种机质量为 600 kg，液压缸导程根据麦棉套种农艺要求选用负荷 1 000 kg、提升行程 0.7 m 的升降液压缸，其结构如图 4 所示，主要由升降装置、牵引装置和控制装置构成。工作时，升降装置在液压缸作用下垂直提升，下降时液压泵卸荷，同时播种机在自重作用下下降。可满足麦棉套种模式下棉花播种时垂直提升的作业要求。

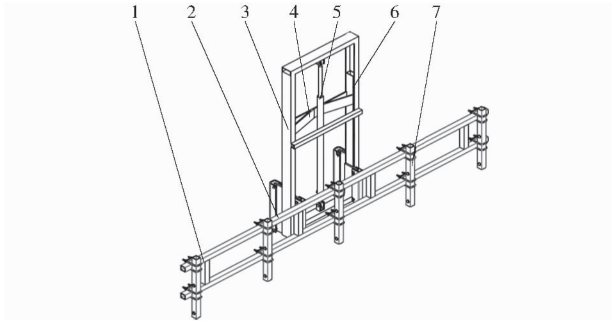


图 4　牵引提升装置结构示意图

Fig. 4　Schematic of traction lifting device structure

1. 牵引系统　2. 牵引横梁　3. 升降系统　4. 内框架　5. 液压缸　6. 外框架　7. 竖梁

### 2.2　播种单组平行四杆仿形机构设计

#### 2.2.1　仿形机构设计

播种机作业时，由于田间地面不平整以及杂草干扰，影响播种工作稳定性[16]。播种单组前端设计仿形机构，确保播种作业顺畅[17]。如图 5 所示，播种机采用单组独立仿形技术，其原理为利用地轮与仿形机构的配合实现对复杂地面的仿形，使播种单组能够跟随地面起伏进行仿形，有效限制开沟深度，从而确保播种作业稳定性和准确性。

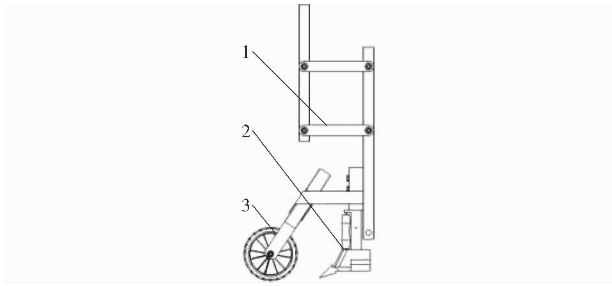


图 5　仿形机构连接示意图

Fig. 5　Schematic of profiling mechanism connection

1. 仿形装置　2. 开沟装置　3. 限深轮

#### 2.2.2　仿形机构受力分析

播种机工作时由仿形机构牵引播种单组进行播种作业，因此机架上每个仿形机构以及播种单组的受力情况均相同，假设在整个播种作业过程播种机为匀速运动且播种情况保持稳定[18]。仿形机构主要受播种单组向下的重力以及机具前进时的牵引力[19]，如图 6 所示。

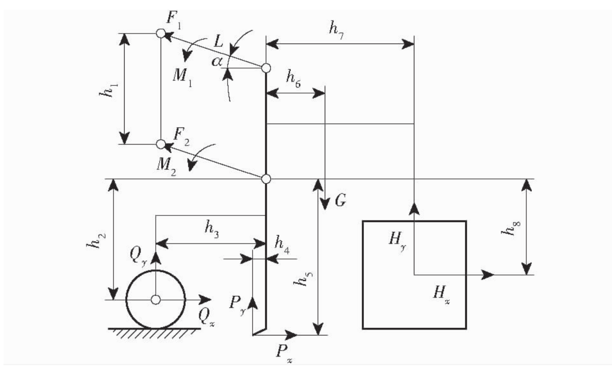


图 6　仿形机构受力分析

Fig. 6　Force analysis of profiling mechanism

由平衡条件可得

$$F_1\cos\alpha + F_2\cos\alpha - Q_x - P_x - H_x = 0 \tag{1}$$

$$F_1\sin\alpha + F_2\sin\alpha - G + P_y + Q_y + H_y = 0 \tag{2}$$

其中

$$Q_x = uQ_y \tag{3}$$

$$P_x = fP_y \tag{4}$$

$$H_x = f'H_y \tag{5}$$

化简得

$$Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} = \frac{G - P_y(1 + f\tan\alpha) - H_y(1 + f')\tan\alpha}{1 + u\tan\alpha}\sqrt{1 + u^2} \tag{6}$$

式中 $F_1$、$F_2$——播种机单组所受牵引力，N

$\alpha$——仿形机构牵引角，(°)

$Q$——仿形地轮前进所需拉力，N

$Q_x$——土壤对仿形地轮的前进阻力，N

$Q_y$——土壤对仿形地轮的垂直反力，N

$P_x$——开沟器受到的前进阻力，N

$P_y$——开沟器受到的垂直反力，N

$H_x$——土壤对穴播器、覆土器和镇压轮整体的前进阻力，N

$H_y$——土壤对穴播器、覆土器和镇压轮整体的垂直反力，N

$G$——播种机单体重力，N

$f$——土壤摩擦因数

$f'$——镇压轮阻力系数

$u$——仿形轮阻力系数

为保证开沟装置稳定作业，播种单组作业时需有一定的预压力，即 $Q > 0$，所以播种单组质量要满足 $G > P_y(1 + f\tan\delta) + H_y(1 + f')\tan\delta$。

### 2.2.3 仿形机构仿形角及仿形量

播种机仿形机构仿形量根据播种前的地形和整地条件而有所不同。通常，牵引角 $\alpha$ 波动幅度与仿形量呈正比，仿形机构上下仿形量为 80 ~ 120 mm[20]。仿形机构极限位置尺寸如图 7 所示。

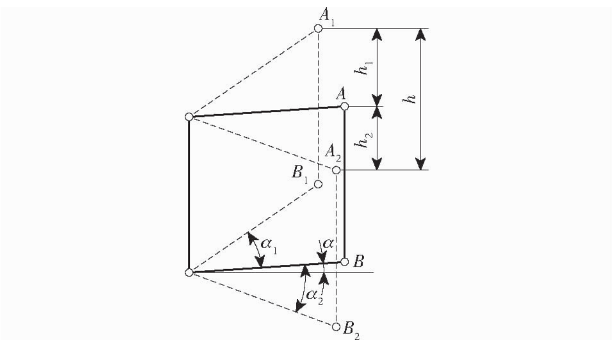


图 7 仿形机构极限位置示意图

Fig. 7 Schematic of limit positions of profiling mechanism

仿形量计算式为

$$h = L(\sin(\alpha + \alpha_1) + \sin(\alpha_2 - \alpha)) \tag{7}$$

式中 $\alpha_1$——上仿形角，(°)

$\alpha_2$——下仿形角，(°)

$L$——仿形机构长度，mm

当前，传统播种机 $\alpha_1$ 通常为 6° ~ 22°，$\alpha_2$ 为 20° ~ 40°。春棉播种期集中在 4 月，此时田间土壤硬度相对较高，导致开沟器在工作时面临较大阻力。为满足春棉播种对于开沟深度的农艺要求，查阅文献[16]以及参考国内外先进播种机，设计初始牵引角 $\alpha$ 为 0°。

仿形机构长度计算式为

$$L = \frac{h_2}{\sin\alpha + \sin(\alpha_2 - \alpha)} \tag{8}$$

式中 $h_2$——下仿形量，取最大值 100 mm

$\alpha_2$ 取 20°，代入式(8)得 $L = 292.38$ mm，取 300 mm，则可以得到上仿形量 $h_1$ 为

$$h_1 = L(\sin(\alpha_1 + \alpha) - \sin\alpha) \tag{9}$$

$\alpha_1$ 取 20°，代入式(9)得 $h_1 = 102$ mm，满足仿形量 80 ~ 120 mm 的要求。

## 2.3 开沟器设计

棉花套种精量播种机需在麦行内进行播种作业，由于小麦生长过程中需及时进行滴水施肥，在 4 月底棉花播种时土壤表面会出现板结现象，土壤坚实度较高，仅采用穴播器播种，鸭嘴插不进土层内，无法满足播种深度要求；通过设置开沟装置可以稳定开沟深度，减少穴播器鸭嘴与地面间压力，确保播种深度一致性。

开沟器性能直接决定开沟质量以及整机能耗水平[21]，同时影响播种效果和后续作物生长。为不影响小麦和棉花各自的生长空间，需精确控制播种深度和宽度，选用结构简单、适合窄行播种的芯铧式开沟器，具体参数为开种沟宽度 100 mm，深度 30 ~ 50 mm。开沟器结构如图 8 所示。

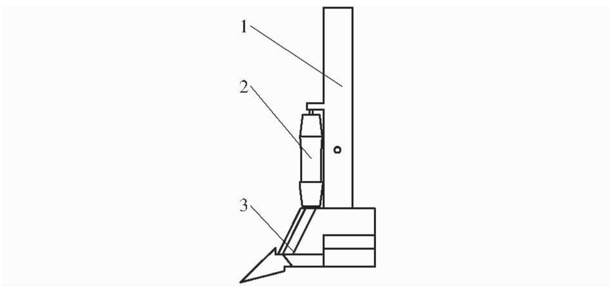


图 8 开沟器结构示意图

Fig. 8 Schematic of furrower structure

1. 支撑部件 2. 防缠绕辊筒 3. 开沟犁

开沟器工作表面弧线与地面间角度称为开沟器入土角[22]，如图 9 所示。以锐角开沟器犁尖 $A$ 为原点建立坐标系，设播种机开沟器工作面弧线所在圆方程为

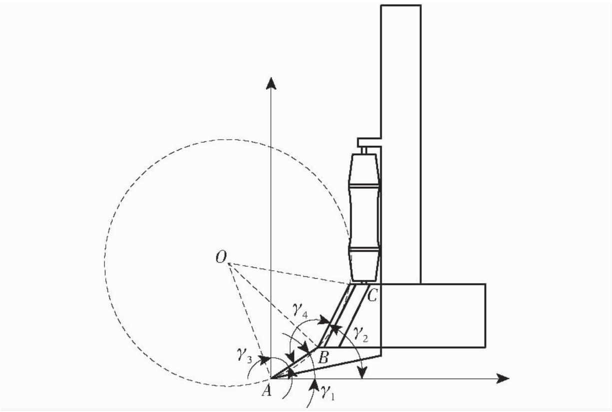


图 9　开沟器角度分析

Fig. 9　Analysis of furrower angle

$$(X-a)^2+(Y-b)^2=R^2 \tag{10}$$

式中　$a$、$b$——圆心 $O$ 横、纵坐标

$R$——圆半径

播种开沟器犁尖 $A$ 坐标为(0,0),顶端与防缠绕管连接点 $C$ 坐标为(90 mm,110 mm),角$\gamma_1$、$\gamma_2$分别为点 $B$ 和点 $C$ 的入土角,通过查阅文献[23]可知,$\gamma_1$取 22°,$\gamma_2$取 60°,由图 9 可得

$$\sin\frac{\gamma_1-\gamma_2}{2}=\frac{L_{OC}}{2R} \tag{11}$$

计算得 $L_{OC}=130$ mm、$R=214$ mm,代入式(10)得播种开沟器入土部件工作面弧线所在圆的方程,则入土部件工作面弧线 $AC$ 上任意一点的入土角 $\gamma$ 计算式为

$$\sin\frac{\gamma_2-\gamma}{2}=\frac{1}{2R} \tag{12}$$

计算得入土角 $\gamma$ 为 50°,根据麦棉套作全程机械化技术农艺要求,麦棉套作棉花套种精量播种机开沟器开沟深度为 50 mm,设计符合要求。

### 2.4　播种装置设计

播种装置是影响播种质量最重要的部件,为保证播种深度、穴粒数、株距、行距准确,覆土厚度需均匀合理,镇压力度合适。设计的播种装置由种箱、穴播器、投种管、固定板内侧的仿形机构、作用于穴播器两侧的弹簧正压装置以及作用在穴播器燕尾上的击打器组成,如图 10 所示。

根据麦棉套种农艺要求,棉花播深为 30 ~ 40 mm,由于田间作业环境复杂会造成播种深度不一致[24],本设计的播种装置在穴播器固定板上增加仿形板与压紧弹簧,弹簧工作形变量为 50 ~ 80 mm,控制播种仿形量为 100 ~ 200 mm,保持播种深度一致,减少机架振动对播种的影响[25]。播种机播种作业时鸭嘴直接与地面接触,极易造成鸭嘴堵土,从而导致穴播器无法工作,降低作业效率;因此在种箱机架侧方以及仿形板上方各增加 1 个击打器,击打器在

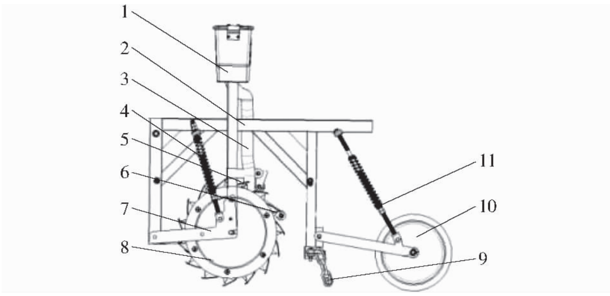


图 10　播种装置结构示意图

Fig. 10　Schematic of seeding device structure

1. 排种箱　2. 机架　3. 投种管　4. 压紧弹簧　5. 上击打器　6. 下击打器　7. 仿形板　8. 穴播器　9. 覆土装置　10. 镇压轮　11. 镇压弹簧

穴播器工作时通过机械力将堵在鸭嘴里的土击打出来,确保鸭嘴正常工作,击打器结构如图 11 所示。播种后覆土装置能及时覆土,镇压轮适度压土,确保播种效果。

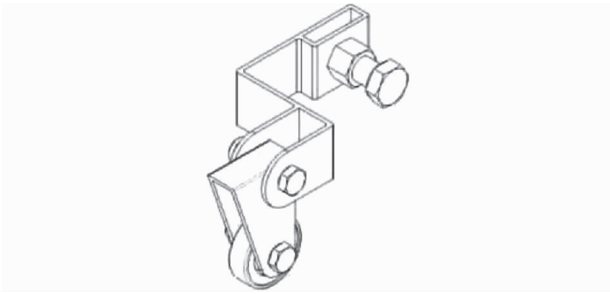

图 11　击打器结构示意图

Fig. 11　Schematic of striker structure

播种机覆土器通常包括覆土环、覆土板和覆土镇压轮等[26],麦棉套种棉花播种作业时覆土装置主要功能为浅埋棉种,覆土厚度为 2.5 ~ 3.0 cm。根据麦棉套种农艺要求选择尺寸更小、质量更轻且易于操作的覆土装置,结合覆土要求选用连环式覆土装置(图 12)。播种机在前进过程,土壤进入链环,内环上的作用力将土层推到种沟上,确保种沟面覆盖一定量土壤。

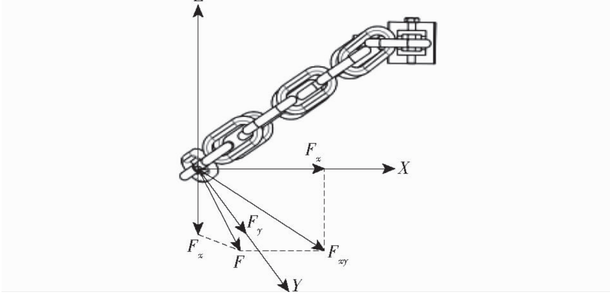


图 12　覆土装置对土壤的作用力

Fig. 12　Effect of soil coverage devices on soil

镇压轮有多种类型,如圆形、凸鼓形、凹腰形等[27]。圆形镇压轮镇压面较宽,压力分布均匀,适用于宽幅开沟器后的镇压;凸鼓形镇压轮对种子上

方土壤的压密作用强；凹腰形镇压轮从两侧将土壤和种子压紧。由于麦棉套种棉花播种作业时表土疏松、种子较小，根据压干不压湿、压软不压硬的镇压原则[28]，选用圆形镇压轮（图13），为减轻粘土现象采用橡胶包边。

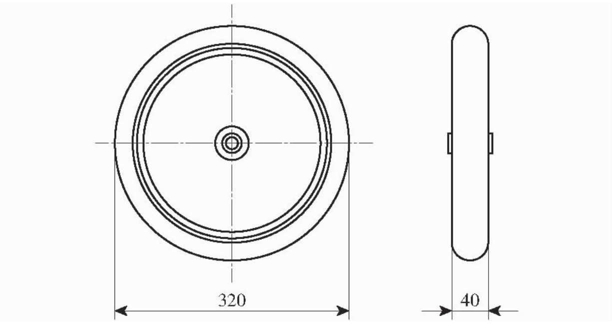


图13 镇压轮示意图

Fig. 13 Schematic of suppression wheel

## 3 整机纵向稳定性分析

### 3.1 平地纵向稳定性

通过对液压缸提升能力、动力平台纵向稳定性与操作性、轮胎承载能力计算与验证，可以确保悬挂农具设计既符合实际需求，又能保证机组在复杂多变的作业环境中始终保持最佳状态。

后悬挂式农具会影响动力平台纵向稳定性，特别是在进行机具运输过程中，这种影响尤为突出且危险[29]。为了确保机具在运输过程保持良好的纵向稳定性和可操作性，悬挂农具质量必须控制在合理范围内，不宜过大，根据《农业机械设计手册》得其极限质量 $G_{\max}$ 计算式为

$$G_{\max}=\frac{0.4G_xh_a}{h_b} \tag{13}$$

式中 $G_x$——动力平台质量，kg

$h_a$——动力平台重心 $O$ 到提升机构支撑点 $A$ 水平距离，mm

$h_b$——机具重心 $B$ 到提升机构支撑点 $A$ 水平距离，mm

通过测量计算得 $G_x$ 为 1 720 kg、$h_a$ 为 1 040 mm、$h_b$ 为 934 mm，代入式（13）得 $G_{\max}=766.08\ \text{kg}>507\ \text{kg}$，符合动力平台采用后悬挂式挂接要求。

### 3.2 爬坡稳定性

播种机在作业时田间地形复杂，尤其在进出田地、地头转弯和动力平台爬坡时易向后倾翻[30]，为了防止动力平台在进行爬坡时发生后倾翻，根据机具爬坡状态分析（图14）计算动力平台的最大爬升角，计算式为

$$\sin\gamma_{\max}=\frac{P_1-(P_{f_1}+P_{f_2})}{G_1+G_2} \tag{14}$$

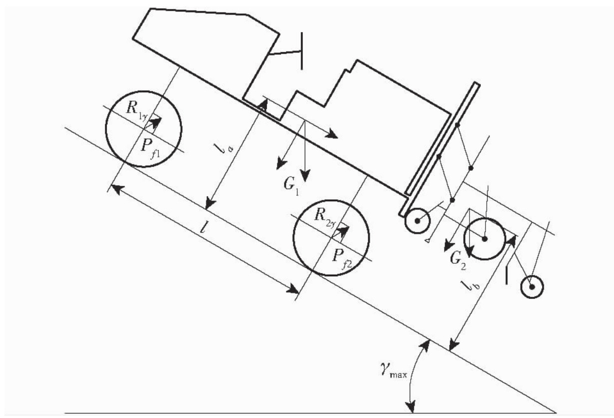


图14 爬坡状态纵向稳定性分析

Fig. 14 Analysis of longitudinal stability in climbing conditions

式中 $\gamma_{\max}$——最大爬升角，（°）

$P_1$——驱动轮切向力，N

$P_{f_1}$——动力平台前轮滚动阻力，N

$P_{f_2}$——动力平台后轮滚动阻力，N

$G_1$——动力平台所受重力，N

$G_2$——播种机所受重力，N

假设动力平台处于理想路面的行驶条件，其滚动阻力 $P_{f_1}$ 与 $P_{f_2}$ 均可近似为零，此时

$$\sin\gamma_{\max}=\frac{P_1}{G_1+G_2}\approx\frac{P_{T\max}+0.1G_1}{G_1+G_2} \tag{15}$$

自走式动力平台在最大坡度角时行驶，前轴净载荷 $R_{1y}$ 为

$$R_{1y}=\frac{(G_st-Gn)\cos\gamma_{\max}-(G_sl_a+Gl_b)\sin\gamma_{\max}}{l} \tag{16}$$

式中 $G$——播种机质量，kg

$G_s$——动力平台与播种机总质量，kg

$l_a$——动力平台重心高度，mm

$l_b$——棉花播种机重心高度，mm

$n$——播种机重心与整机重心距离，mm

$t$——动力平台重心与整机重心距离，mm

$l$——动力平台轮距，mm

通过查阅文献[31]得我国耕地可分为平耕地、缓坡耕地和陡坡耕地3种，坡度为0°~25°，本文采用25°作为自走式动力平台空载时最大爬升角，此时后轴净载荷 $R_{2y}$ 计算式为

$$R_{2y}=\frac{G_st\cos\gamma_{\max}-G_sl_a\sin\gamma_{\max}}{l} \tag{17}$$

通过软件模拟和样机测量与计算得，$G=507\ \text{kg}$，$G_s=1\,720\ \text{kg}$，$n=900\ \text{mm}$，$l_b=1\,430\ \text{mm}$，$t=1\,040\ \text{mm}$，$l_a=1\,124\ \text{mm}$，$l=2\,320\ \text{mm}$，计算得动力平台前轴净载荷 $R_{1y}=346.6\ \text{kN/m}^2$。当播种机位于最大坡度角时，$R_{2y}$ 应不小于动力平台不带农具时前轴

静载荷的 20%，取 $R_{2y}=69.32\ kN/m^2$，将数值代入式(17)求得 $\gamma_{max}=23.4°$

## 4　开沟装置仿真模拟试验

开沟效果是影响播种效果的主要因素，开沟过程土壤与开沟装置相互作用关系复杂，理论分析难度较大，且本设计棉花套种精量播种机作业环境特殊，开沟装置多次进地试验易损伤小麦；为研究开沟装置结构设计对播种质量的影响，通过仿真探明播种机不同前进速度、开沟深度以及开沟器前进过程中所受阻力，准确获取防缠绕锐角开沟器在开沟过程中对土壤的扰动程度。通过 EDEM 离散元法，模拟播种机开沟装置在土壤中水平运动过程，观察开沟过程中开沟器对土壤的扰动程度，通过仿真结果对整个过程进行分析。

土壤颗粒尺寸设置对仿真结果和计算时间有重要影响[32]。以单个球体作为土壤颗粒模型，颗粒模型半径设置为 2 mm。根据防缠绕锐角开沟器结构，用 Solidworks 三维软件进行建模，如图 15 所示。

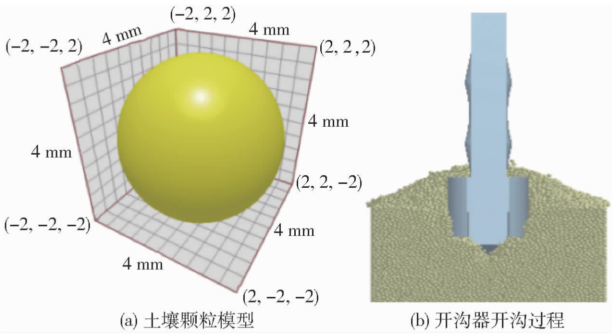


图 15　开沟过程离散元仿真模型

Fig. 15　Discrete element simulation model of trenching process

### 4.1　参数确定

材料参数包括土壤颗粒、开沟装置密度、泊松比和剪切模量；接触参数包括土壤与土壤、土壤与开沟器之间的恢复系数、静摩擦因数、动摩擦因数，如表 2 所示。

### 4.2　开沟器工作过程仿真分析

根据颗粒类型和土壤位置设置颗粒工厂，为保证机具在作业过程中有充足空间，经多次试验后将土槽长宽高设为 250 mm × 200 mm × 150 mm。为了更好地观察开沟器作业过程中土壤的扰动程度，在土槽内生成土壤颗粒使其充满土槽，待颗粒完全生成后，使其充分沉淀，得到颗粒总数为 129 928。

表 2　仿真参数的设定值

Tab. 2　Simulation parameter settings

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 土壤密度/($kg·m^{-3}$) | 2 550 |
| 土壤泊松比 | 0.35 |
| 土壤剪切模量/Pa | $1\times10^6$ |
| 土壤含水率/% | 19 |
| 土壤颗粒数 | 129 928 |
| 土壤颗粒半径/mm | 2 |
| 开沟器密度/($kg·m^{-3}$) | 7 800 |
| 开沟器泊松比 | 0.3 |
| 开沟器剪切模量/Pa | $7\times10^7$ |
| 土壤-土壤间恢复系数 | 0.56 |
| 土壤-土壤间静摩擦因数 | 0.341 |
| 土壤-土壤间动摩擦因数 | 0.31 |
| 开沟器-土壤间恢复系数 | 0.62 |
| 开沟器-土壤间静摩擦因数 | 0.435 |
| 开沟器-土壤间动摩察因数 | 0.26 |

对不同作业速度和不同开沟深度对土壤的扰动程度和回土深度进行分析，利用 Clipping 和 Setup Selection 功能，截取开沟器开沟沟型，如图 16 所示。

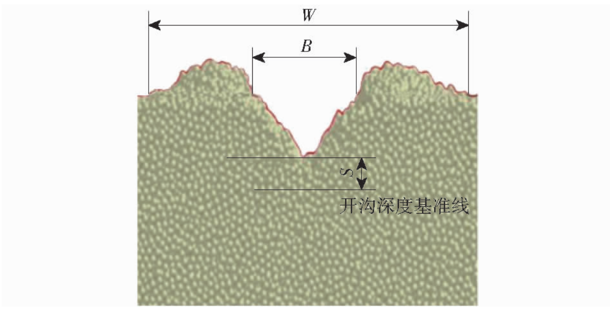


图 16　模拟开沟器沟形和形状参数

Fig. 16　Simulation of trenching machine groove shape and shape parameters

选择关键参数开沟宽度 $B$、土壤扰动宽度 $W$ 和土壤回土高度 $S$ 进行测量，对开沟器工作状态模拟的沟形测量结果如表 3 所示。

表 3　锐角开沟器不同开沟深度和开沟速度下回土深度和扰动程度

Tab. 3　Soil return depth and disturbance degree of acute angle trencher at different trenching depths and different trenching speeds

| 开沟深度/mm | 开沟速度/($km·h^{-1}$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2.8 | | | 3.6 | | | 4.8 | | |
| | 回土深度/mm | 开沟宽度/mm | 扰动宽度/mm | 回土深度/mm | 开沟宽度/mm | 扰动宽度/mm | 回土深度/mm | 开沟宽度/mm | 扰动宽度/mm |
| 30 | 6.3 | 24 | 160 | 8.2 | 25 | 171 | 11.1 | 20 | 166 |
| 50 | 8.7 | 88 | 224 | 10.8 | 82 | 222 | 15.7 | 81 | 225 |
| 70 | 11.6 | 76 | 328 | 15.9 | 83 | 230 | 67.4 | 85 | 227 |

由表 3 可知，开沟器回土深度随着作业速度和开沟深度的增加而增大，同时开沟器对土壤的扰动程度随着开沟深度增加而增大，但开沟速度对土壤的扰动程度影响不明显。

当开沟器深度为 50 mm、作业速度为 3.6 km/h 时，回土深度为 10.8 mm、开沟宽度为 82 mm，沟形满足播种要求，且开沟装置对土壤扰动程度较小，能够最大程度满足麦棉套作模式下播种要求。

## 5 田间试验

### 5.1 试验条件

整机性能田间试验于 2024 年 4 月 25 日在山东省滨州市惠民县种植示范基地内麦套棉试验场地开展，试验时土壤含水率为 23.4%、土壤坚实度为 2 003.7 kPa、小麦高度为 40.2 mm、棉花播种作业宽度为 38.6 mm。选取试验品种为鲁研棉 37 号，百粒质量 8.6 g，原始破损率为 0.5%，发芽率为 87.6%，符合文献[33]相关规定。

### 5.2 试验方法

为进一步验证麦棉套作棉花精量播种机作业效果，参照 GB 6973—1986《单粒(精密)播种机试验方法》，在测区内进行试验(图 17)，每次测 5 行，每行连续测 250 个株距，少于 5 行者全测，以播种合格率和漏播率为指标判断机具播种性能，设计单因素试验和正交组合试验，结合作业速度、开沟深度、开沟器与穴播器水平间距对播种性能的影响，确定最优工作参数组合。播种合格率 $\delta$ 和漏播率 $J$ 计算式为

$$\delta = \frac{N_1}{N'} \times 100\% \tag{18}$$

式中 $N_1$——合格穴数

$N'$——总穴数

(a) 试验场地 (b) 整机性能试验 (c) 株距测量 (d) 播种深度测量

图 17 田间试验

Fig. 17 Field experiment

$$J = \frac{N_2}{N'} \times 100\% \tag{19}$$

式中 $N_2$——漏播穴数

### 5.3 单因素试验

播种作业时，当机具前进速度过低，会导致覆土装置带土量大，对种子发芽产生影响；当机具前进速度过快，穴播器滑动量增加，会出现漏种和空穴现象[34]。为此，采用工作速度 1.8 ~ 5.4 km/h 进行测试，结果见表 4。

**表 4 机具作业速度对播种性能的影响**

**Tab. 4 Effect of machine operation speed on sowing performance**

| 作业速度/(km·h$^{-1}$) | 播种合格率/% | 漏播率/% |
|---|---|---|
| 1.8 | 78.2 | 0.45 |
| 2.7 | 85.3 | 0.69 |
| 3.6 | 93.4 | 1.72 |
| 4.5 | 79.6 | 2.27 |
| 5.4 | 76.9 | 3.18 |

由表 4 可知，机具作业速度为 1.8 ~ 5.4 km/h 时，漏播率随播种速度上升而增大；播种合格率随播种速度上升呈先增后减态势，因此选取机具作业速度为 2.7 ~ 4.5 km/h。

当开沟深度过浅，开沟后地表虚土过少，穴播器鸭嘴无法破开深层土壤，燕尾张开角度小，种子无法正常下落，会发生重播、漏播现象；当开沟深度过深，易造成穴播器下陷，导致穴播器无法正常运转，进而发生漏播现象[35]。采用开沟深度为 10 ~ 90 mm 进行试验，试验结果如表 5 所示。

**表 5 开沟深度对播种性能的影响**

**Tab. 5 Effect of furrow depth on sowing performance**

| 开沟深度/mm | 播种合格率/% | 漏播率/% |
|---|---|---|
| 10 | 76.4 | 0.42 |
| 30 | 82.3 | 0.59 |
| 50 | 91.2 | 0.81 |
| 70 | 80.9 | 1.54 |
| 90 | 73.5 | 2.17 |

由表 5 可知，开沟深度为 10 ~ 90 mm 时，漏播率随开沟深度加大而增大；播种合格率随开沟深度加大呈先增后减态势，因此选取开沟深度为 30 ~ 70 mm。

当开沟器与穴播器距离过短，开沟器工作后，土壤还未回填，穴播器作业时只有地面一道沟形，造成鸭嘴未入土或燕尾打不开，导致漏播及重播；当开沟器与穴播器水平距离过长，播种装置稳定性下降，工作时穴播器出现摆动，易造成漏播及重播现象[36]。采用开沟器与穴播器水平距离为 230 ~ 510 mm 进行试验，结果如表 6 所示。

表 6　开沟器与穴播器水平间距对播种性能的影响

Tab. 6　Effect of horizontal spacing between furrow opener and hole seeder on sowing performance

| 开沟器与穴播器水平间距/mm | 播种合格率/% | 漏播率/% |
|---|---|---|
| 230 | 75.2 | 0.52 |
| 300 | 83.1 | 0.69 |
| 370 | 90.1 | 0.81 |
| 440 | 84.8 | 0.92 |
| 510 | 75.2 | 1.17 |

由表 6 可知，漏播率在该间距范围内呈缓慢上升趋势，播种合格率随间距加大呈先增后减态势，因此选取开沟器与穴播器水平间距为 300 ~ 440 mm。

### 5.4　正交试验

利用 Design-Expert 软件设计三因素三水平二次回归正交试验，选取作业速度、开沟深度和开沟器与穴播器水平间距 3 个关键影响因素，进行多元拟合与回归性分析，构建关于播种合格率$Y_1$与漏播率$Y_2$回归模型。试验因素编码如表 7 所示，试验设计与结果如表 8 所示，$X_1$、$X_2$、$X_3$为因素编码。

表 7　试验因素编码

Tab. 7　Test factors and codes

| 编码 | 因素 | | |
|---|---|---|---|
| | 作业速度/(km·h$^{-1}$) | 开沟深度/mm | 开沟器与穴播器水平间距/mm |
| −1 | 2.7 | 30 | 300 |
| 0 | 3.6 | 50 | 370 |
| 1 | 4.5 | 70 | 400 |

表 8　试验设计与结果

Tab. 8　Test design and results

| 试验编号 | 因素 | | | $Y_1$/% | $Y_2$/% |
|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 92.3 | 0.81 |
| 2 | −1 | 0 | 1 | 77.8 | 0.69 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 90.6 | 0.71 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 72.5 | 2.24 |
| 5 | −1 | −1 | 0 | 86.7 | 0.64 |
| 6 | −1 | 0 | −1 | 82.2 | 0.71 |
| 7 | 1 | 1 | 0 | 81.6 | 2.56 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 93.8 | 0.72 |
| 9 | 1 | −1 | 0 | 78.4 | 2.13 |
| 10 | 0 | −1 | −1 | 84.8 | 1.72 |
| 11 | 0 | −1 | 1 | 81.9 | 1.73 |
| 12 | 1 | 0 | −1 | 79.5 | 2.36 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 88.9 | 0.78 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 90.6 | 0.85 |
| 15 | 0 | 1 | −1 | 82.4 | 1.87 |
| 16 | −1 | 1 | 0 | 80.5 | 0.72 |
| 17 | 0 | 1 | 1 | 79.2 | 1.82 |

应用 Design-Expert 软件对试验数据拟合并进行方差分析，结果如表 9 所示。

表 9　方差分析结果

Tab. 9　Result of ANOVA

| 试验指标 | 变异来源 | 平方和 | 自由度 | $F$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 播种合格率 $Y_1$ | 模型 | 519.59 | 9 | 23.11 | 0.000 2** |
| | $X_1$ | 16.53 | 1 | 11.16 | 0.012 4* |
| | $X_2$ | 2.10 | 1 | 3.17 | 0.118 3 |
| | $X_3$ | 30.42 | 1 | 14.79 | 0.006 3** |
| | $X_1X_2$ | 15.60 | 1 | 8.54 | 0.022 3* |
| | $X_1X_3$ | 1.000 0 | 1 | 0.653 1 | 0.445 6 |
| | $X_2X_3$ | 0.040 0 | 1 | 0.008 7 | 0.928 3 |
| | $X_1^2$ | 192.27 | 1 | 74.30 | <0.000 1** |
| | $X_2^2$ | 41.98 | 1 | 11.71 | 0.011 1* |
| | $X_3^2$ | 176.94 | 1 | 68.37 | <0.000 1** |
| | 残差 | 15.80 | 7 | | |
| | 失拟项 | 1.83 | 3 | 0.395 3 | 0.764 1 |
| | 误差 | 13.97 | 4 | | |
| | 总和 | 535.39 | 16 | | |
| 漏播率 $Y_2$ | 模型 | 8.05 | 9 | 235.40 | <0.000 1** |
| | $X_1$ | 5.33 | 1 | 1 402.92 | <0.000 1** |
| | $X_2$ | 0.070 3 | 1 | 18.51 | 0.003 6** |
| | $X_3$ | 0.004 0 | 1 | 1.07 | 0.336 2 |
| | $X_1X_2$ | 0.030 6 | 1 | 8.06 | 0.025 1* |
| | $X_1X_3$ | 0.002 5 | 1 | 0.658 0 | 0.444 0 |
| | $X_2X_3$ | 0.000 9 | 1 | 0.236 9 | 0.641 3 |
| | $X_1^2$ | 0.216 5 | 1 | 56.98 | 0.000 1** |
| | $X_2^2$ | 1.10 | 1 | 290.24 | <0.000 1** |
| | $X_3^2$ | 1.05 | 1 | 276.23 | <0.000 1** |
| | 残差 | 0.026 6 | 7 | | |
| | 失拟项 | 0.012 5 | 3 | 1.18 | 0.422 9 |
| | 误差 | 0.014 1 | 4 | | |
| | 总和 | 8.08 | 16 | | |

注：* 表示显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），** 表示极显著（$P < 0.01$）。

播种合格率和漏播率回归方程为

$$\begin{aligned}Y_1 = {} & 91.24 - 1.9X_1 - 1.01X_2 - 2.19X_3 + \\ & 2.35X_1X_2 - 0.65X_1X_3 - 0.075X_2X_3 - \\ & 6.76X_1^2 - 2.68X_2^2 - 6.48X_3^2\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}Y_2 = {} & 0.77 + 0.81X_1 + 0.09X_2 - 0.02X_3 + \\ & 0.87X_1X_2 - 0.02X_1X_3 + 0.015X_2X_3 + \\ & 0.23X_1^2 + 0.51X_2^2 + 0.499X_3^2\end{aligned} \tag{21}$$

由表 9 可知，播种合格率 $F$ 为 23.11，$P$ 为 0.000 2，表明所构建的回归模型极显著；而在失拟性检验中，$P$ 为 0.764 1，表明失拟性不显著，即试验模型模拟结果与实际情况高度吻合。模型一次项$X_1$、$X_3$影响均为显著；二次项$X_1^2$、$X_2^2$、$X_3^2$ 影响为显著；交互项$X_1X_2$影响为显著。对播种合格率的影响由大到小依次为开沟器与穴播器水平间距、作业速度、开沟深度。$X_1X_2$对播种合格率影响的响应曲面如图 18 所示。

漏播率回归模型 $P$ 小于 0.000 1，表明所构建的回归模型具有极显著差异。同时，在失拟性检验中

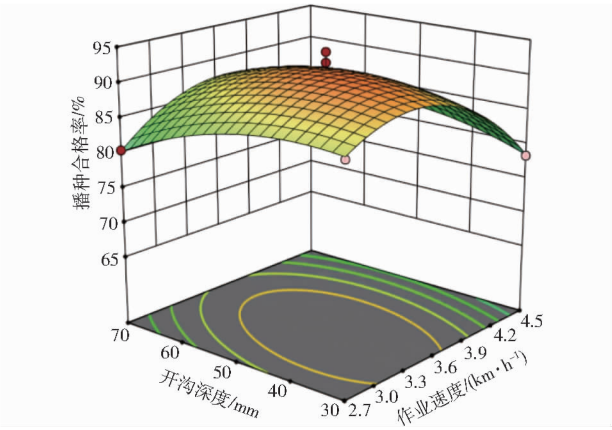


图 18　播种合格率双因素响应曲面($X_3=0$)

Fig. 18　Dual-factor response surface for sowing qualification rate

$P$ 为 0.422 9,表明失拟性不显著,即试验模型模拟效果与实际情况高度一致。回归模型一次项 $X_1$、$X_2$ 影响为极显著;二次项 $X_1^2$、$X_2^2$、$X_3^2$ 影响为极显著;交互项 $X_1X_2$ 影响为显著。对漏播率的影响由大到小依次为作业速度、开沟深度、开沟器与穴播器水平间距。$X_1X_2$ 对漏播率影响的响应曲面如图 19 所示。

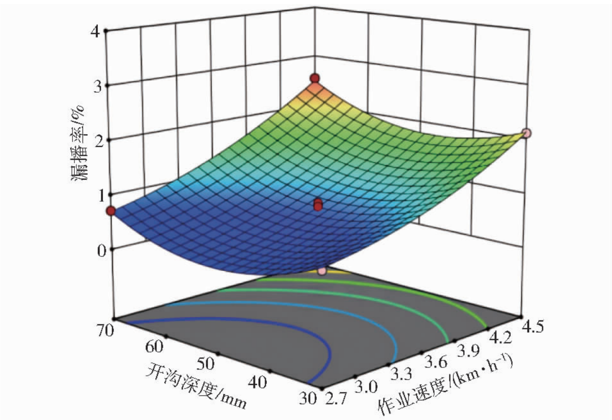


图 19　漏播率双因素响应曲面($X_3=0$)

Fig. 19　Response surface of dual factors affecting missed broadcast rate

### 5.5　正交试验优化

经过前进速度、开沟深度和开沟器与穴播器水平间距三因素交互作用对棉花播种合格率和漏播率影响的分析,通过 Design-Expert 软件对 3 项参数进行优化,得到播种机作业最佳参数组合:作业速度为 3.4 km/h、开沟深度为 45 mm、开沟器与穴播器水平间距为 360 mm,此时播种机播种合格率达 91.7%,而漏播率则低至 0.64%。

对优化后参数进行田间试验验证,如图 20 所示,结果显示播种合格率为 92.1%,漏播率为 0.62%,基本符合理论结果。优化后播种机性能得到了显著提升,田间试验验证(图 20)结果表明麦棉套作棉花套种精量播种机各项指标均达到设计及相关标准要求,该机具能够完成预期作业,工作稳定性强、效率高。

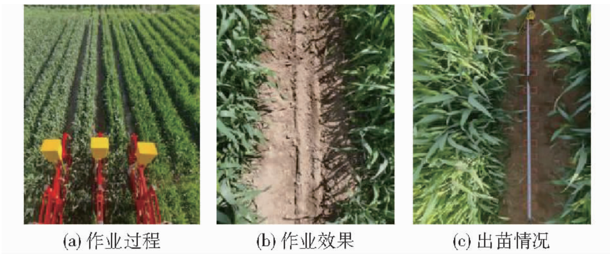


图 20　各参数优化后田间作业验证

Fig. 20　Field operation verification after optimization of all parameters

## 6　结论

(1)通过对平行四杆仿形机构的设计和理论分析确定了其结构参数,平行四杆仿形机构长度为 300 mm、牵引角 $\alpha$ 取 20°,得仿形量为 80 ~ 120 mm;对防缠绕锐角开沟器进行设计分析,得入土角度 $\gamma$ 为 50°;设计播种装置,针对鸭嘴堵土问题设计击打器;分析麦棉套种农艺要求,选用链环式覆土装置、圆形镇压轮,满足覆土镇压要求。通过对牵引提升装置和麦棉套作棉花套种精量播种机进行平地和爬坡状态纵向稳定性分析,确定了动力平台极限负荷质量为 795.02 kg,播种机最大爬升角为 23.4°,满足整机纵向稳定性要求。

(2)采用 EDEM 软件对防缠绕锐角开沟器进行仿真分析,建立防缠绕开沟器简化模型和土壤颗粒模型,研究开沟器在不同前进速度、不同入土深度开沟器所受到的阻力和对土壤扰动的影响,当开沟深度为 50 mm、作业速度为 3.6 km/h 时,回土深度为 10.8 mm,开沟宽度为 82 mm,开沟装置对土壤扰动程度较小,满足麦棉套作模式下播种要求。

(3)采用单因素试验和三因素三水平二次回归正交试验方法进行分析,得出最优参数组合为作业速度 3.4 km/h、开沟深度 45 mm、开沟器与穴播器水平间距 360 mm,此时综合响应值最大,播种合格率为 91.7%,漏播率为 0.64%。对优化后参数进行试验验证,结果显示播种合格率为 92.1%,漏播率为 0.62%,基本符合理论结果。

## 参　考　文　献

[1]　苑严伟,白圣贺,牛康,等. 棉花种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(6):1-11.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress in the key technologies and equipment for cotton planting

mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 1-11. (in Chinese)
[2] 张清华,贺维昭,裴美燕. 2011—2020 年国家审定黄河流域春棉品种产量及相关性状分析[J]. 中国棉花,2023,50(5): 17-21.
ZHANG Qinghua, HE Weizhao, PEI Meiyan. Analysis on yield and related traits of national registered spring-planted cotton varieties in the Yellow River Basin from 2011 to 2020[J]. China Cotton,2023,50(5):17-21. (in Chinese)
[3] 张友昌,冯常辉,别墅,等. 长江流域棉花机械化生产现状与发展建议[J]. 中国棉花,2020,47(9):1-4.
ZHANG Youchang, FENG Changhui, BIE Shu, et al. Present situation and development suggestion of cotton mechanized production in the Yangtze River valley[J]. China Cotton, 2020, 47(9): 1-4. (in Chinese)
[4] 张子晴,张道军,陈亮,等. 黄河流域城镇化与耕地利用生态效率的耦合协调度评价、时空特征及驱动因素[J]. 农业工程学报,2024,40(16):240-250.
ZHANG Ziqing, ZHANG Daojun, CHEN Liang, et al. Coupling coordination evaluation, spatiotemporal characteristics and driving factors between urbanization and cultivated land use ecological efficiency in the Yellow River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(16): 240-250. (in Chinese)
[5] 刘太杰,刘锦涛,万素梅,等. 不同品种与播期对麦棉套作棉花生长、产量及棉铃空间分布的影响[J]. 新疆农业科学, 2021,58(8):1382-1391.
LIU Taijie, LIU Jintao, WAN Sumei, et al. Effects of different variety and sowing dates on cotton growth, yield and cotton bolls spatial distribution in wheat and cotton intercropping[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(8): 1382-1391. (in Chinese)
[6] BAI S, YUAN Y, NIU K, et al. Design and experiment of a sowing quality monitoring system of cotton precision hill-drop planters[J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1117.
[7] TURNER J A. The cotton planter's manual[M]. University of Michigan Library, 2023.
[8] 史增录,王美静,张学军,等. 折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):53-62.
SHI Zenglu, WANG Meijing, ZHANG Xuejun, et al. Design and test of folding cotton wide film spreading precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery,2024,55(8):53-62. (in Chinese)
[9] 曹秀振,赵淑红,刘宏俊,等. 垄间套播冬小麦免耕播种机设计与试验[J]. 农机化研究,2016,38(7):157-161.
CAO Xiuzhen, ZHAO SHuhong, LIU Hongjun, et al. Design and experiment of winter-wheat no-tillage seeder for inter-planting [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(7):157-161. (in Chinese)
[10] 陈雄飞,罗锡文,曾山,等. 一种跨垄式深施肥套种机的研究[C]∥中国农业工程学会 2011 年学术年会,2011:4.
[11] 鲁滨,黄志东,闫洪山,等. 2BG-6 型麦田套种高架播种机[J]. 新疆农机化,2002(6):36-37.
[12] MUHAMMAD T, MUHAMMAD N A, MUHAMMAD A, et al. Relay cropping of cotton in wheat improves productivity of cotton-wheat cropping system[J]. Plos One,2022,17(8):e0272188.
[13] 马华章. 麦棉套种模式下的高架式棉花播种机设计与试验[D]. 石河子:石河子大学,2023.
MA Huazhang. Design and experiment of overhead cotton seeder under wheat-cotton nesting mode[D]. Shihezi: Shihezi University,2023. (in Chinese)
[14] 卢薇,罗江河,李明,等. 轻简型棉花播种机设计与试验[J]. 湖南农业科学,2024(11):81-86.
LU Wei, LUO Jianghe, LI Ming, et al. Design and test of a light and simple cotton seeder[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2024(11):81-86. (in Chinese)
[15] 赵淑红,刘佳明,赵国鹏,等. 侧深施肥直斜偏置式免耕播种开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(11):26-37.
ZHAO Shuhong, LIU Jiaming, ZHAO Guopeng, et al. Design and experiment of the straight oblique offset no-tillage sowing furrow opener with side deep fertilization[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(11):26-37. (in Chinese)
[16] 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J]. 农业工程学报,2013, 29(14):26-32.
ZHAO Shuhong, JIANG Enchen, YAN Yixun, et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(14):26-32. (in Chinese)
[17] 衣淑娟,李怡凯,李衣菲,等. 玉米高速免耕播种机液压主动仿形机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12): 110-120.
YI Shujuan, LI Yikai, LI Yifei, et al. Design and test of hydraulic active profiling mechanism for high-speed no-till corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery,2024,55(12):110-120. (in Chinese)
[18] 衣淑娟,李怡凯,陈继国,等. 俯仰式播种单体仿形性能检测试验台设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):90-100.
YI Shujuan, LI Yikai, CHEN Jiguo, et al. Design and test of pitching seeding unit profiling performance testing bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery,2024,55(2):90-100. (in Chinese)
[19] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(4):16-24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(4):16-24. (in Chinese)
[20] 赖庆辉,吕勤,贾广鑫,等. 开沟-排种单体式人参精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):72-82,98.
LAI Qinghui, LÜ Qin, JIA Guangxin, et al. Design and test of ginseng precision seeder with ditching and seeding monomer

type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery,2022,53(9):72-82,98. (in Chinese)

[21] 刘瑞,李衍军,刘春晓,等.铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):89-96.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Chunxiao, et al. Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery, 2021,52(9):89-96. (in Chinese)

[22] 杨云峰,邢茂德,路雅洁,等.棉花单粒播种的发展现状与对策[J].中国棉花,2024,51(4):9-12.
YANG Yunfeng, XING Maode, LU Yajie, et al. Development status and countermeasures of the single-seed sowing of cotton [J]. China Cotton,2024,51(4):9-12. (in Chinese)

[23] 刘天龙.适宜黏重土壤的芯铧式播种开沟器优化设计与试验[D].保定:河北农业大学,2024.
LIU Tianlong. Optimized design and testing of core-share seeding openers suitable forclay-heavy soils[D]. Baoding: Hebei Agricultural University,2024. (in Chinese)

[24] 韩立志.圆柱螺旋弹簧的设计[J].价值工程,2010,29(3):44.

[25] 瞿书涯.型孔式小区精密播种关键部件设计与试验[D].南京:南京农业大学,2016.
QÜ Shuya. Design and experimental evaluation on a shaped orifice precision plot seeder[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2016. (in Chinese)

[26] 何勋,张景风,张润,等.小麦宽苗带种沟镇压播种装置研制[J].农业工程学报,2023,39(18):18-29.
HE Xun, ZHANG Jingfeng, ZHANG Run, et al. Development of the seed-ditch compaction device for wide-boundary sowing wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 18-29. (in Chinese)

[27] 郭乾坤,骆佳钰.小麦春季肥水管理措施[J].农家致富,2024(5):28-29.

[28] 张晓瑛.轮式拖拉机后悬挂农机具的优化配置和安全校核[J].拖拉机与农用运输车,2020,47(6):27-28,32.
ZHANG Xiaoying. Optimal configuration and safety check of rear mounted agricultural implements for wheeled tractor[J]. Tractor and Agricultural Transport Vehicle,2020,47(6):27-28,32. (in Chinese)

[29] 廖庆喜,何坤,万星宇,等.履带联合收获机式动力平台油菜直播机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):54-64.
LIAO Qingxi, HE Kun, WAN Xingyu, et al. Devices for rapeseed direct seeder on tracked combined harvesting power platform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery,2021,52(12):54-64. (in Chinese)

[30] 第三次全国国土调查技术规程:TD/T 1055—2019[S].2019.

[31] YAN D, YV J, WANG Y, et al. Soil particle modeling and parameter calibration based on discrete element method[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1421.

[32] 张还,郭鑫雨,张健,等.马铃薯播种机两段式组合起垄装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):76-83,92.
ZHANG Huan, GUO Xinyu, ZHANG Jian, et al. Design and experiment of two-stage combined ridging device for potato planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery,2023,54(Supp.1):76-83,92. (in Chinese)

[33] 经济作物种子　第1部分:纤维类:GB 4407.1—2008[S].2008.

[34] 王小瑜,康建明,丁汉凤,等.2BM-4型藜麦覆膜精量播种机设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):86-94.
WANG Xiaoyu, KANG Jianming, DING Hanfeng, et al. Design and test of 2BM-4 film mulch precision planter for quinoa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery, 2020,51(12):86-94. (in Chinese)

[35] 贾洪雷,孟凡豪,刘立晶,等.芯铧式开沟器仿生设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(4):44-49,77.
JIA Honglei, MENG Fanhao, LIU Lijing, et al. Biomimetic design and experiment of core-share furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Mathinery,2020,51(4):44-49,77. (in Chinese)

[36] 张明华,王在满,罗锡文,等.水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(5):10-15.
ZHANG Minghua, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of furrowing device of precision hill-drop drilling machine for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 10-15. (in Chinese)